

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Fakultät für Architektur

Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen

Entwicklung eines klimaneutralen Heiz- und Kühlkonzepts unter
Anwendung von Optimierungsverfahren in der Gebäudesimulation

Daniel Alexander Kierdorf

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität
München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Werner Lang
2. Prof. Thomas Auer

Die Dissertation wurde am 25.07.2019 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Architektur am 13.11.2019 angenommen.

Für Theresa

Zusammenfassung

Die Identifizierung der ausschlaggebenden Parameter innerhalb thermisch-energetischer Anlagensimulationen von Gebäuden ermöglicht den Planern, die energieverbrauchenden Prozesse individuell anzupassen. Die vorliegende Arbeit beschreibt ein Vorgehen zur Identifikation einflussreicher Parameter auf den Simulationsoutput innerhalb von Anlagen- und Gebäudesimulationen. Dadurch sind Planer in der Lage, ausreichende Erkenntnisse über das Gebäude- und Anlagenkonzept zu erhalten. Nachhaltige Versorgungskonzepte und der Einsatz erneuerbarer Energien kann hierdurch gefördert werden.

Der Untersuchungsgegenstand basiert auf einem Referenzraum nach Niedrigstenergiestandard und einer regenerativen Wärme- und Kälteversorgung mit sensiblen thermischen Speichern. Durch die Anwendung von Sensitivitätsanalysen und Optimierungsverfahren werden die einflussreichsten Parameter auf den Simulationsoutput identifiziert. Als Zielfunktion für die Optimierungsverfahren wird die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes definiert. Anhand der untersuchten Varianten (Variation Klima, Variation interne Lasten, Variation raumluftechnischer Anlagen) wird die Relevanz der Kollektorfläche sowie der Absorberfläche innerhalb einer regenerativen Energieversorgung aufgezeigt.

Das beschriebene Vorgehen sowie die Betrachtung unterschiedlicher Szenarien erlaubt eine Übertragbarkeit auf andere Gebäude- und Anlagenmodelle. Es soll Planungsprozesse zur Umsetzung energieeffizienter und nachhaltiger Gebäude unterstützen.

Abstract

An identification of the dominant parameters of the energetic sustainability of a building a priori enables planners to tailor the thermal energy consuming processes. Thereby sustainable supply concepts and the implementation of renewable energies can be supported.

In this work, a simulation tool and an analysis framework are introduced to optimize a reference room based on a nearly-zero energy standard by means of a regenerative heating and cooling concept with sensitive thermal storage tanks. The most influential parameters on the simulation output are identified by a sensitivity analysis and optimized on the maximum of hours in the comfort band. The relevance of the collector surface as well as the absorber surface within a regenerative energy supply system is shown on the basis of the variation of climate, internal loads and air-conditioning systems.

The described procedure enables a transferability to other building and system models. It is intended to support planning processes for the implementation of energy-efficient and sustainable buildings.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner interdisziplinären Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen der Technischen Universität München.

Die Anfertigung dieser Arbeit wäre durch die Unterstützung vieler Personen nicht möglich gewesen. An erster Stelle möchte ich mich herzlichst bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Werner Lang für die fachliche und persönliche Begleitung während meiner Tätigkeit an der Technischen Universität München bedanken. Die wertvollen Gespräche und Anregungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Ein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Thomas Auer für die Übernahme des Koreferats und die freundliche sowie fachliche Begleitung des Promotionsvorhabens. Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Barthel danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Danken möchte ich außerdem allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Lehrstuhl, die mich während meiner Tätigkeit an der TU München begleitet und unterstützt haben. Besonderer Dank geht an Christina Meier-Dotzler, Hannes Harter, Michael Vollmer, Sandro Pfoh, Karl-Martin Heißler, Johannes Maderspacher, Sebastian Botzler, Simone Linke, Melih Pürnak und Michael Keltsch. Ohne euch hätte die Arbeit nur halb so viel Spaß gemacht. Für stets motivierende und aufbauende Worte möchte ich Julia Brasche danken.

Ein weiterer Dank gilt meiner liebevollen Familie, besonders meinen Eltern Bernd und Bettina und meiner Schwester Kristina, die mich auf meinem Weg stets unterstützen. Abschließend möchte ich mich bei meiner Frau Katharina für den nötigen Ausgleich bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einführung	1
2 Hintergrund	3
2.1 Energiebedarf und -versorgung von Gebäuden	3
2.2 Energieeffizienz im Gebäudesektor	4
2.3 Energiepreisentwicklung, CO ₂ -Neutralität und Energiewende	5
2.4 Klimaschutzziele im Gebäudesektor	6
2.5 Vision 2050	7
2.6 Kurzzusammenfassung	8
3 Zielsetzung	9
3.1 Ziel der Arbeit	9
3.2 Aufbau der Arbeit	9
4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude	11
4.1 Energieeinsparung auf der Bedarfsseite	11
4.2 Niedrigstenergiestandard 2021	13
4.3 Effizienzsteigerung in der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden	16
4.4 Effiziente Energiegewinnung am Gebäude und Einsatz alternativer Energieträger	25
4.5 Werkzeuge zur energetischen Gebäude- und Anlagensimulation und Optimierung	37
4.6 Kurzzusammenfassung	41
5 Grundlagen der Optimierung	43
5.1 Mathematischer Sachverhalt	43
5.2 Deterministische Optimierungsverfahren	46
5.3 Stochastische Optimierungsverfahren	50
5.4 Kurzzusammenfassung	53
6 Stand der Forschung – Optimization in Building Science	55
6.1 Aktueller Forschungsstand	57
6.2 Forschungsfragen und Forschungshypothese	63
6.3 Kurzzusammenfassung	64
7 Beschreibung des Simulationsmodells und des methodischen Vorgehens	65
7.1 Modelldefinition und Implementierung in ein Gebäudesimulationsprogramm	66

7.2	Darstellung der Variablen	70
7.3	Sensitivitätsanalyse (SA)	72
7.4	Einbindung der Optimierung	74
7.5	Ausgangssituation	75
7.6	Energetische Gebäude- und Anlagenoptimierung	81
7.7	Ablauf der Optimierungssimulation	82
7.8	Leitgedanke der verwendeten Methodik	84
7.9	Kurzzusammenfassung	84
8	Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells	85
8.1	Variation Klima	85
8.2	Variation der internen Lasten	93
8.3	Variation raumluftechnischer Anlagen	98
8.4	Optimierung der betrachteten Szenarien	104
8.5	Optimierung aller Parameter	108
8.6	Übertragbarkeit und Anwendung des Vorgehens	114
8.7	Kurzzusammenfassung	115
9	Fazit	117
9.1	Verifizierung der Forschungshypothese	117
9.2	Einordnung in den Stand des Wissens	117
9.3	Erkenntnisse aus dem Untersuchungsgegenstand	119
9.4	Schlussfolgerung und Ausblick	119
9.5	Kritische Betrachtung	120
9.6	Kurzzusammenfassung	121
	Abkürzungsverzeichnis	132
	Abbildungsverzeichnis	135
	Tabellenverzeichnis	139

1 Einführung

Zur Realisierung eines klimaneutralen Gebäudebestands steht das optimierte Zusammenspiel lokal gewonnener, regenerativer Energie und energiesparender, innovativer Energieerzeugungstechnologien im Vordergrund [1]. Darüber hinaus fördert die Effizienzsteigerung gebäudetechnischer Komponenten eine erfolgreiche Umsetzung von energieeffizienten und nachhaltigen Gebäuden. Zukünftig sollen Gebäude geplant und gebaut werden, die mindestens so viel Energie regenerativ erzeugen, wie sie benötigen. Die technischen Möglichkeiten, dieses Vorhaben in die Tat umzusetzen, sind vorhanden, müssen aber in einen optimierten und funktionsfähigen Zusammenhang gebracht werden. Innerhalb früher Planungsphasen möglichst genaue und aussagekräftige Aussagen über das Gebäude und seine Anlagentechnik treffen zu können, erleichtert das Verständnis über das Zusammenwirken aller beteiligten Prozesse sowie die benötigten technischen Installationen eines Gebäudes.

Mit zunehmenden Wärmeschutzanforderungen (1. Wärmeschutzverordnung 1977 bis zur heutigen Energieeinsparverordnung (EnEV)) lässt sich eine Verschiebung des Fokus auf die technische Ausstattung von Gebäuden erkennen. Die bauphysikalischen Randbedingungen stoßen nach und nach an ihre physikalischen Grenzen. Um dennoch die nationalen und internationalen Ziele zum Klimaschutz einhalten zu können, ist eine Technisierung des Bausektors in Form von bedarfsgerechter und optimierter Anlagentechnik zwingend erforderlich. Steigende Kosten in der Energieversorgung, die Komplexität der Energiewende sowie eine steigende Konzentration auf CO₂-neutrale Gebäude stellen Planer vor immer größere Herausforderungen. Leicht verständliche Lösungsansätze, die diese Herausforderungen und Fragestellungen eines Systems auf ein Minimum reduzieren und somit die Kommunikation in einer interdisziplinären Projektgruppe weiter voranbringen, fördern die Realisierung von nachhaltigen Gebäuden.

Die energetische Gebäudesimulation erlaubt es, vor Baubeginn einen ersten Eindruck vom Energiebedarf sowie die benötigte technische Ausstattung des geplanten Gebäudes zu ermitteln. Für das Ziel, Gebäude energetisch zu optimieren, können Tools zur Anlagenoptimierung eingesetzt werden. Energetische Potentiale (u.a. Reduzierung des Energieverbrauchs, gebäudetechnische Optimierung) können frühzeitig aufgedeckt und die Anlagen energieeffizient auslegt und betrieben werden. Hierdurch lassen sich anlagentechnische Komponenten effizienter gestalten. Um das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestands zu erreichen, müssen mithilfe gebäudetechnischer Optimierungswerkzeuge energieeffiziente und nachhaltige Gebäude- und Anlagenkonzepte geplant und gebaut werden.

Diese Arbeit zeigt ein methodisches Vorgehen, das durch das Zusammenwirken von Optimierungsverfahren und Sensitivitätsanalyse (SA) frühzeitig Erkenntnisse über die Relevanz

1 Einführung

einzelner gebäudetechnischer Komponenten liefert. Das Ziel ist es, anhand eines Referenzraums und einer Referenzanlagentechnik basierend auf regenerativen Energien Informationen über die Wichtigkeit einzelner Parameter zu erlangen. Das dargestellte Vorgehen soll in Entscheidungskriterien über das geplante System liefern sowie auf andere Gebäude- und Anlagenkonzepte übertragbar sein.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Übertragung von bestehenden Sensitivitätsanalysemethoden sowie gängigen Optimierungsverfahren auf gebäudetechnische Anlagenkonzepte innerhalb thermisch-energetischer Simulationsmodelle. Als anwendungsbezogener Untersuchungsgegenstand dient ein vereinfachtes Gebäudemodell nach Niedrigstenergiestandard mit einem zukunftsfähigen und klimaneutralen Anlagenkonzept. Es wird gezeigt, dass Entscheidungskriterien in den ersten Leistungsphasen festgelegt werden können und so zu einem optimierten Planungsprozess beitragen können.

2 Hintergrund

Nachfolgend wird auf den aktuellen Stand des Energiebedarfs und der Energieversorgung von Gebäuden eingegangen sowie Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz im Gebäudesektor aufgezeigt. Darüber hinaus werden die Problematiken der Energiepreisentwicklung in Deutschland, die CO₂-Neutralität des Gebäudesektors und die Energiewende thematisiert. Nach Einführung der Klimaschutzziele der Bundesrepublik Deutschland wird eine Vision des Gebäudebestands im Jahr 2050 vorgestellt.

2.1 Energiebedarf und -versorgung von Gebäuden

Um angenehme Innenraumbedingungen sicherzustellen, benötigen Gebäude Energie zum Heizen, Kühlen, Lüften (eventuell Be- und Entfeuchten sowie Filtern) sowie für sonstige Verbraucher (elektronische Geräte etc.). Je nach Gebäudeart und -nutzung variiert die prozentuale Verteilung der genannten Energieverbraucher.

Die Betrachtung der Endenergie zeigt die Bedeutung des Gebäudesektors. Im Jahr 2012 betrug der Endenergieverbrauch des Gebäudesektors zur Erzeugung von Warmwasser (6,78 %), Raumwärme (72,27 %) und -kälte (2,65 %) sowie für den Betrieb von Elektrogeräten und der Beleuchtung (18,29 %) 36,7 % am gesamten Endenergieverbrauch der Bundesrepublik Deutschland [2]. Dies zeigt, dass im Gebäudesektor und vor allem im Bereich der Raumwärme immense Einsparpotentiale vorliegen.

Trotz energieeffizienter Geräte ist davon auszugehen, dass der Endenergieverbrauch – z. B. bedingt durch den demografischen Wandel, wirtschaftlichen Wohlstand, mehr Wohnfläche pro Person, Anstieg der Anzahl der Elektrogeräte pro Haushalt – zukünftig mindestens gleichbleibend, wenn nicht sogar steigen wird.

Neben effizienzsteigernden Maßnahmen und der Optimierung der Anlagentechnik müssen fossile Energieträger durch regenerative Energiequellen ersetzt werden. Aktuell bedient sich die Mehrheit aller Gebäude einer fossilen Energieversorgung. Bedingt durch die Knappheit fossiler Energieträger und dem Streben nach einer sicheren und nachhaltigen Energieversorgung steigt der Ausbau regenerativer Energieerzeugungsanlagen in Deutschland an. Deutlich wird diese Entwicklung am Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch der Bundesrepublik. Die Bruttostromerzeugung aus erneuerbaren Energien lag im Jahr 2017 bei 216.338 GWh und somit bei einem prozentualen Bruttostromverbrauch von 36,0 % [3].

2 Hintergrund

Der Ausbau wird sich in den nächsten Jahren wahrscheinlich fortsetzen. Gründe hierfür sind der Ausstieg aus der Atomkraft bis 2022 (Dreizehntes Gesetz zur Änderung des Atomgesetzes, vom 31. Juli 2011), sowie die Ziele der Bundesregierung in Form des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und der EnEV. Hierbei verfolgt die Bundesregierung das Ziel, bis zum Jahr 2020 einen Ausbau der erneuerbaren Energien bis auf 35% an der Stromversorgung zu realisieren [4]. Dieses Ziel wurde zum aktuellen Zeitpunkt bereits erreicht. In mehreren Etappen wird bis 2050 ein Anteil von 80% angestrebt. Aber auch das Ziel der lokalen Energieerzeugung (Energieerzeugung und Energieverbrauch am selben Ort) muss weiter verfolgt werden, da bei Transport der Energie sowie bei der Umwandlung von Hoch- auf Niederspannung weitere Energieverluste auftreten, die vermieden werden müssen. Darüber hinaus können so Eingriffe in die Landschaft umgangen werden.

Nach Angaben des *United Nations Environment Programme (UNEP)* kann der Primärenergieverbrauch für Heizen und Kühlen von Gebäuden allein durch Sanierung des Gebäudebestands und durch Modernisierung der Energieversorgungssysteme bis zu 50 % gesenkt werden. [5]

2.2 Energieeffizienz im Gebäudesektor

Die Effizienz am Gebäude zu erhöhen, um einen niedrigen bis keinen fossilen Energieeinsatz zu erreichen, ist seit den Ölkrisen der 1970er Jahre wesentlicher Bestandteil in der Forschung und Entwicklung. Dieses Vorhaben ist jedoch nur möglich, wenn die Baukonstruktion und die Anlagentechnik aufeinander abgestimmt sind und das Gesamtsystem dynamisch betrachtet wird. Um zugleich den Fokus auf die Optimierung regenerativ genutzter Energie zu setzen, müssen thermisch-energetische Simulationsmodelle herangezogen werden. Nur so kann ein optimierter Betrieb des Gebäudes abgebildet und später realisiert werden.

Mit einer ausschließlichen Energiegewinnung aus erneuerbaren Energieträgern würde sich die Bundesrepublik unabhängig von allen fossilen Energieträgern machen und auf Energiezukäufe aus dem Ausland verzichten können. Jedoch bedingen geografische und meteorologische Gegebenheiten eine fluktuierende Energiebereitstellung, die eine Energieversorgung aus rein regenerativen Energiequellen einschränkt [6].

Diese ungleiche Verteilung der Energiegewinnung (im Norden eher Windkraftanlagen, im Süden eher Photovoltaikanlagen) könnte zwar durch geeignete Energiespeicher kompensiert werden, jedoch sollte die Erzeugung am Gebäude einen Energietransport möglichst ausschließen. Das Abfangen von thermischen Lastspitzen durch sensible thermische Speicher bietet ein nachhaltiges Potential zur Speicherung solarer Energie. Es gilt den Energiebedarf des Gebäudes zu reduzieren, ohne die Behaglichkeit im Innenraum einzuschränken.

Neben den gesetzlichen Anforderungen zur Energiewende sollten grundlegende Ziele von energieeffizienten und nachhaltigen Gebäuden berücksichtigt werden, um die thermische Behaglichkeit im Innenraum zu gewährleisten. Folgende Aspekte tragen dazu bei, energieeffiziente und nachhaltige Gebäude zu realisieren [7] [8]:

- Integrales Konzept zur Minimierung des Gesamtenergiebedarfs
- Wärme erhalten und effizient bereitstellen
- Wärme- und Kältebereitstellung mit niedrigen Primärenergiekennwerten
- Überhitzung vermeiden und Wärme effizient abführen
- Effiziente Energiespeicherung
- Angepasste Glasflächen und Verglasungsqualitäten
- Integrale Lüftungsplanung
- Natürlich Lüften und effizient maschinell Lüften
- Effizientes Raumklimakonzept und Minimierung innerer und äußerer Wärmelasten
- Nutzen von Tageslicht mit angepasstem architektonischen Entwurf
- Effiziente künstliche Beleuchtung
- Einsatz effizienter Geräte und Energie-Monitoring
- dezentrale Stromgewinnung

2.3 Energiepreisentwicklung, CO₂-Neutralität und Energiewende

Einen Anreiz zur regenerativen Energiegewinnung am Gebäude bietet die Betrachtung der Energiepreisentwicklung der letzten Jahre im Vergleich zur Entwicklung des Einkommens in Deutschland. Es ist ersichtlich, dass die Ausgaben für Energie prozentual in den letzten Jahren angestiegen sind und sich in Zukunft wahrscheinlich weiter erhöhen werden. Dem gegenüber ist eine nahezu konstant bleibende Entwicklung des Reallohnindex erkennbar.

In Abbildung 2.1 ist diese Entwicklung über den Zeitraum von 2000 bis 2012 dargestellt. Anhand der gepunkteten Linien ist die grobe Tendenz der Einkommens- (blaue Linie) und Energiepreisentwicklung für elektrische Energie (graue Linie) erkennbar. Die grünen Linien visualisieren die Verbraucherpreisentwicklung für Erdgas. Es lässt sich feststellen, dass bei leicht sinkendem Reallohn die Aufwendungen für elektrische Energie und Erdgas gestiegen sind. Den Eigenbedarf der Nutzer mit regenerativ gewonnener Energie am Gebäude zu decken, hat somit einen wesentlichen Einfluss auf die Betriebskosten und die Wirtschaftlichkeit eines Gebäudes.

2 Hintergrund

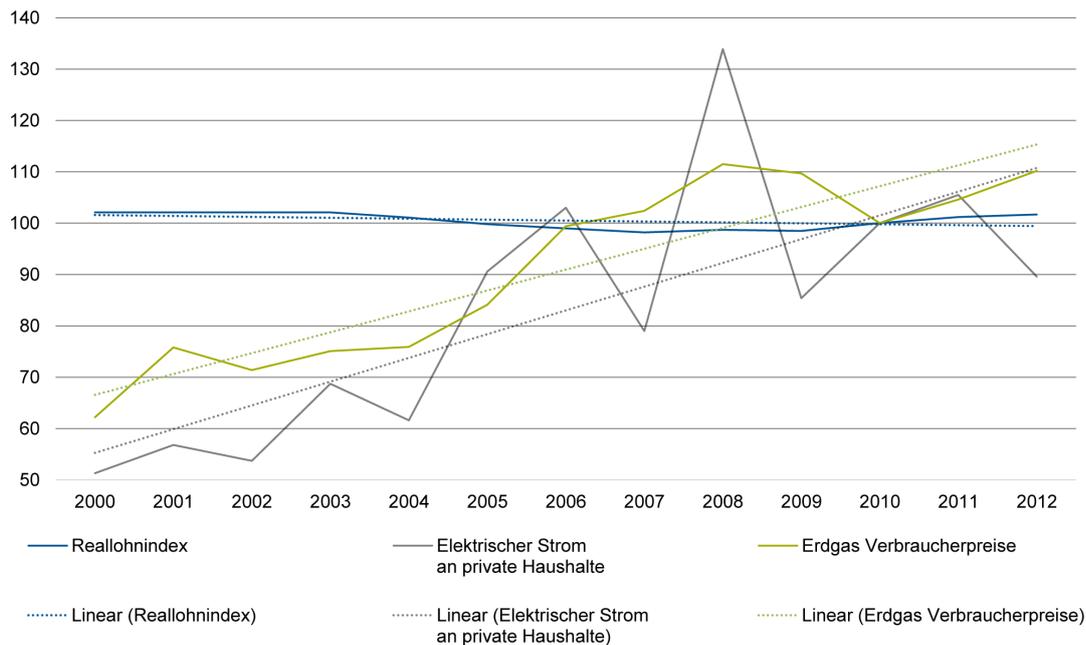


Abbildung 2.1: Gegenüberstellung der Reallohnentwicklung und der Energiepreissteigerung 2000 - 2012 [9] [10]

Mithilfe von solarthermischen und photovoltaischen Anlagen lassen sich fossile Energieträger zum Beheizen und Kühlen von Gebäuden vermeiden zu Gunsten einer nachhaltigen Energieversorgung. Durch den Einsatz von Solarkollektoren können laufende Kosten reduziert und die Nutzung regenerativ gewonnener Energie positiv beeinflusst werden. Neben ökologischen Aspekten spielen auch ökonomische Aspekte eine wesentliche Rolle zur Umsetzung thermischer Energiegewinnung aus solarthermischen Anlagen. So amortisieren sich Anlagen zur eigenen Energienutzung meist innerhalb weniger Jahre und es kann kostengünstig Energie bezogen werden. Auch der Einsatz von Photovoltaikanlagen bietet ökonomische Vorteile in Form einer Einspeisevergütung bzw. der Deckung des Eigenbedarfs.

Das Ziel der zukünftigen Energieversorgung liegt in der Umstellung bisheriger Energieträger (Kohle, Öl, Gas und Atomkernenergie) auf eine nachhaltige Energieversorgung auf Basis von alternativen Energieträgern [11]. Durch effiziente Nutzung der Sonnenenergie können nahezu alle benötigten Temperaturbereiche des Gebäudesektors abgedeckt werden. Diese Umstellung auf regenerativ gewonnene Energie ist möglich, es muss aber an diversen Stellen angesetzt werden, um ein komplettes System basierend auf regenerativen Energien zu realisieren.

2.4 Klimaschutzziele im Gebäudesektor

Neben dem Verkehrssektor und dem Industriesektor ist der Gebäudesektor der drittgrößte Energieverbraucher in der Bundesrepublik Deutschland und für ca. 26% des Endenergieverbrauchs verantwortlich [12]. Mit Inkrafttreten der ersten EnEV im Jahr 2002 wurde auf die Potentiale der Energieeinsparung im Gebäudesektor reagiert. Aus dem im Jahr 2011

veröffentlichten 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung geht hervor, dass das Ziel der Bundesregierung eine „umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung“ ist. Dieses Ziel würde sich in Form eines energieneutralen Gebäudebestands bis zum Jahr 2050 zeigen (§1 EnEV). Mithilfe zunehmender baugesetzlicher Verschärfungen trägt der Gesetzgeber durch strenge energetische Anforderungen wesentlich dazu bei, den Energieverbrauch von Gebäuden zu reduzieren. [13]

Die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu den Jahren 2020 bzw. 2050 lauten:

- Treibhausgasemissionen:
Reduzierung der Treibhausgasemissionen im Vergleich zu 1990 um mindestens 40 % (bis 2020) bzw. 80-95 % (bis 2050)
- Energieeffizienz:
Reduzierung des Primärenergieverbrauchs (gegenüber 2008) um 20 % (bis 2020) bzw. 50 % (bis 2050) Steigerung der Endenergieproduktivität (2008 - 2050) um jährlich 2,1 %
Reduzierung des Bruttostromverbrauchs (gegenüber 2008) um 10 % (bis 2020) bzw. 25 % (bis 2050)
- Gebäudebestand:
Reduzierung des Wärmebedarfs um 20 % (bis 2020 gegenüber 2008)
Reduzierung des Primärenergiebedarfs im Gebäudesektor um 80 % (bis 2050 gegenüber 2008)
- Ausbau regenerativer Energien:
Erhöhung des Anteils der erneuerbaren Energien an der Stromversorgung auf 35 % (bis 2020) bzw. 80 % (bis 2050)

2.5 Vision 2050

Im Jahr 2050 sollen die Gebäude der Bundesrepublik klimaneutral und nachhaltig betrieben werden. Die Vorgaben internationaler Einrichtungen, wie das Kyoto Protokoll der Organisation der Vereinten Nationen, geben eine klare Richtung zur effizienten Nutzung von Energie vor, die auf Bundesebene bereits in Form des EEG, des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) und der Energieeinsparverordnung (EnEV) Anwendung findet.

Die Richtlinie 2010/31/EU des Europäischen Parlaments und des Rates fordert bereits ab 2021 europaweit einen Niedrigstenergiestandard für Neubauten, der zur „[...] Senkung des Energieverbrauchs und [...] Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen im Gebäudesektor [...]“ beiträgt und somit „[...] zur Verringerung der Energieabhängigkeit der Union und der Treibhausgasemissionen“ führt. Darüber hinaus sollen „[...] Maßnahmen zur weiteren Verbesserung der Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden [...]“ unter Berücksichtigung der „[...] klimatischen und lokalen Bedingungen sowie dem Innenraumklima und der Kosteneffizienz“ vorangetrieben werden. [14]

2 Hintergrund

Im Bereich des Neubaus werden, bedingt durch nationale und internationale Regularien, bereits hocheffiziente Technologien eingesetzt. Diese in den Kontext nachhaltiger Entwicklung zu bringen, stellt die wesentliche Problematik aller forschenden und entwickelnden Einrichtungen dar. Ziel hierbei ist es, sog. Plusenergiegebäude bzw. *Nearly Zero Energy Buildings (nZEB)* zu realisieren, die einen geringen Energiebedarf, bzw. in ihrer energetischen Bilanzierung sogar eine positive Energiebilanz aufweisen.

Mit einer luftdichten Gebäudehülle, energieeffizienten Geräten und einer ganzheitlichen Betrachtung kann ein nachhaltig orientiertes Energieversorgungssystem entstehen, das es zukünftigen Generationen erlaubt, einen vergleichbaren Zugang zu Energie zu erhalten, wie es vorangegangenen Generationen möglich war. Solare Energiegewinnung und nachhaltige Speichertechnologien bieten hier bedeutendes Potential, das unter optimierten Bedingungen Anwendung finden sollte, um einen klimaneutralen Gebäudebetrieb gewährleisten zu können.

2.6 Kurzzusammenfassung

Um steigenden Energiepreisen entgegenzuwirken werden umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgungssysteme gefordert. Dies führt zu einer steigenden Nachfrage nach energieeffizienten und nachhaltigen Energieversorgungskonzepten (mit Fokus auf regenerative Energien) im Gebäudesektor, mit dem Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestands bis zum Jahr 2050.

3 Zielsetzung

3.1 Ziel der Arbeit

Unter den genannten energiepolitischen Zielen der Bundesregierung wird ein Anlagen- und Regelungskonzept entwickelt, das den Anforderungen standhalten und zu einem klimaneutralen Gebäudebetrieb beitragen kann. Hierzu wird anhand eines Referenzraums ein thermisch-regeneratives Heiz- und Kühlkonzept entwickelt. Die Energiegewinnung am Gebäude steht hierbei im Vordergrund. Durch Anwendung von Optimierungsverfahren und Sensitivitätsanalyse (SA) werden die einflussreichsten Komponenten auf die Simulationsergebnisse dieses Anlagenkonzepts identifiziert. Der Planungsprozess der Anlagendimensionierung wird in Abhängigkeit des Innenraum- und Außenraumklimas optimiert.

In einem weiteren Schritt wird das Anlagenkonzept extremeren Randbedingungen (bzgl. Klima, Gebäudenutzung, raumluftechnischer Anlagen und Beleuchtung) unterzogen und auf seine Einsatzfähigkeit hin getestet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird nachgewiesen, wie der Einsatz von SA und Optimierungsverfahren innerhalb energetischer Gebäudesimulationen Potential zur Abschätzung des Einsatzes regenerativer Energien in den ersten Leistungsphasen hat. Das beschriebene Vorgehen erlaubt eine einfache Handhabung sowie die Übertragbarkeit auf variierende Gebäude- und Anlagenkonzepte zur Umsetzung energieeffizienter und klimaneutraler Gebäude.

Die gewonnenen Erkenntnisse sollen dabei helfen, versorgungs- und gebäudetechnische Anlagen hinsichtlich ihrer Effizienz und ihrer Zukunftsverträglichkeit zu optimieren und dadurch den Primärenergieeinsatz im Gebäudesektor zu reduzieren. Dabei liegt der Fokus auf der Nutzung regenerativer Energien als Beitrag zu einem klimaneutralen Gebäudebestand 2050.

In der vorliegenden Arbeit wird vorausgesetzt, dass die elektrische Energieversorgung von Gebäuden aus regenerativ gewonnenen Energien gedeckt wird. Es werden lediglich Heiz- und Kühlszenarien zur behaglichen Temperierung des Innenraums betrachtet. Eine Kopplung einzelner Sektoren wird hierbei nicht genauer untersucht.

3.2 Aufbau der Arbeit

Nachdem **Kapitel 1** und **Kapitel 2** auf die Thematik hingeführt und eine Übersicht zur aktuellen Problemstellung der energetischen Versorgung dargestellt haben, werden in **Kapitel 4** die Grundlagen energieeffizienter Gebäude ausgeführt. Möglichkeiten zur Energieeinsparung

3 Zielsetzung

auf der Bedarfsseite werden vorgestellt sowie der Einsatz von regenerativen Energien unter dem Aspekt der effizienten Energiegewinnung diskutiert und zukunftsweisende Technologien aufgezeigt. Abschließend wird auf den aktuellen Stand der Technik sowie auf die Planungs- und Dimensionierungsmethoden gebäudetechnischer Anlagen eingegangen.

Kapitel 5 stellt den mathematischen Sachverhalt zum Einsatz von Optimierungswerkzeugen dar. Darüber hinaus werden deterministische und stochastische Optimierungsverfahren vorgestellt. Abschließend wird der Einsatz von Optimierungswerkzeugen innerhalb der Gebäude- und Anlagensimulation diskutiert.

Der aktuelle Stand der Forschung wird in **Kapitel 6** präsentiert. Hierbei wird im Wesentlichen auf Forschungen mit dem Einsatz von Optimierungswerkzeugen im Rahmen von Anlagen- und Gebäudesimulationen eingegangen.

Mit den in Kapitel 4 gewonnenen Erkenntnissen über die Grundlagen energieeffizienter Gebäude sowie die Prinzipien der Optimierung aus Kapitel 5 und dessen aktueller Stand der Forschung aus Kapitel 6 werden abschließend die Forschungsfragen sowie die Forschungshypothese formuliert.

In Kapitel **Kapitel 7** wird ein Referenzraum definiert sowie die Anlagentechnik des Untersuchungsmodells und die Implementierung in ein Gebäudesimulationsprogramm vorgestellt. Bevor die Optimierungsverfahren an das Simulationsmodell gekoppelt werden, wird der Untersuchungsgegenstand einer Sensitivitätsanalyse nach Morris unterzogen und eine Ausgangssituation geschaffen. Darauf aufbauend wird die Zielfunktion für diese Betrachtung aufgestellt sowie der Ablauf des Optimierungsverfahrens dargestellt.

Kapitel 8 beschäftigt sich mit der Analyse und Auswertung des Untersuchungsgegenstands hinsichtlich variierender klimatischer Bedingungen (zukünftige Wetterszenarien für 2030, 2050 und 2100), Variation der internen Lasten und Variation der raumluftechnischen Anlagen. Die Übertragbarkeit sowie die Anwendung der Erkenntnisse wird an dieser Stelle diskutiert.

Abschließend werden die Erkenntnisse in **Kapitel 9** zusammengefasst und die Arbeit in den aktuellen Stand der Forschung eingeordnet. Das Potential des gewonnenen Wissens wird dargestellt und weiteres Forschungspotential aufgezeigt.

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

Um zukünftigen Generationen eine nachhaltige Energieversorgung unabhängig von fossilen Energieträgern zu hinterlassen, müssen drei wesentliche technologische Änderungen erfolgen: Energieeinsparung auf der Bedarfsseite (siehe hierzu Kapitel 4.1), Effizienzsteigerungen in der Energieproduktion (siehe hierzu Kapitel 4.3) sowie der Austausch fossiler Energieträger durch alternative Energieträger (siehe hierzu Kapitel 4.4). [15]

Nachfolgend wird auf diese drei geforderten Aspekte eingegangen und es werden Möglichkeiten für eine nachhaltige und klimaneutrale Energieversorgung aufgezeigt. Der Fokus liegt hier auf der klimaneutralen Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden. Aus diesem Grund werden ausschließlich zukunftsweisende Technologien am Gebäude zur Schaffung eines behaglichen Innenraumklimas herangezogen. Abschließend werden aktuelle Planungsmethoden gebäudetechnischer Anlagen vorgestellt und ein richtungsweisender Ansatz für die zukünftige Planung von gebäudetechnischen Anlagen gegeben.

4.1 Energieeinsparung auf der Bedarfsseite

Die Maßnahmen und Möglichkeiten zur Energieeinsparung auf der Bedarfsseite lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: die baukonstruktive und die gebäudetechnische Seite. Im Folgenden werden jeweils zukunftsfähige Möglichkeiten aufgezeigt, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen und zu einem klimaneutralen Gebäudebetrieb beitragen.

4.1.1 Baukonstruktive Energieeinsparmaßnahmen

Um die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden zu steigern, gelten rechtliche Verordnungen. Aus bautechnischer Sicht zählen hierzu in erster Linie die Reduzierung der Wärmeverluste an die Umgebung sowie die baukonstruktive Minimierung der Heiz- und Kühllasten eines Gebäudes. Darüber hinaus muss darauf geachtet werden, dass der Jahresprimärenergiebedarf für Heizung, Warmwasser, Lüftung und Kühlung einen vorgegebenen maximalen Höchstwert nicht überschreitet. Die rechtlichen Rahmenbedingungen werden in der Energieeinsparverordnung (EnEV) sowie im Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz (EEWärmeG) festgehalten.

Mit jeder Novellierung der EnEV werden diese Anforderungen verschärft, mit der Folge, dass ab 2021 Neubauten als sog. Niedrigstenergiegebäude ausgeführt werden müssen [16][17].

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

Niedrigstenergiegebäude sind Gebäude, die eine sehr hohe Gesamtenergieeffizienz aufweisen und einen Großteil ihrer benötigten Energie aus regenerativen Energiequellen decken. Im Idealfall wird diese Energie am Standort selbst gewonnen und sorgt für eine hohe Eigenbedarfsdeckung. Für öffentliche Bauten gilt dieser Standard bereits ab 2019. [14]

Diese Verordnungen und Richtlinien in einen nachhaltigen Zusammenhang und somit in eine ganzheitliche Betrachtung zu bringen, sind aktuelle Herausforderungen in Forschung und Entwicklung. Zukünftig muss vermehrt auf eine ökonomische und ökologische Umsetzung von Bauvorhaben geachtet und eine umfassende Betrachtungsweise herangezogen werden.

Nachfolgend werden die Anforderungen der Energieeinsparverordnung 2009 und 2016 sowie die des Passivhaus-Institut (PHI)-Standards anhand von opaken und transparenten Bauteilen beschrieben sowie ein Niedrigstenergiestandard nach [18] vorgestellt, der in ähnlicher Art ab 2021 Anwendung finden könnte.

4.1.2 Opake Bauteile

Die Anforderungen der EnEV an die opaken Bauteile zur Einhaltung des maximalen Jahresprimärenergiebedarfs nahmen mit der Novellierung von 2009 auf 2016 zu. Das PHI fordert nochmals einen strengeren Wärmedurchgangskoeffizienten. Eine kurz- bis mittelfristige Entwicklung des Baustandards lässt vermuten, dass die Anforderungen an Wärmedurchgangskoeffizienten bis 2021 strenger werden und sich z.B. die Koeffizienten für opake Bauteile einem Wert von $U = 0,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ annähern. Tabelle 4.1 verdeutlicht die Anforderungen an die opaken wärmeübertragenden Flächen der genannten Baustandards.

Tabelle 4.1: Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der opaken Bauteile von Nichtwohngebäuden [13] [18] [19]

Baustandard	Anforderungen an Wärmedurchgangskoeffizienten
EnEV 2009	$U = 0,35 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
EnEV 2016	$U = 0,28 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
PHI	$U < 0,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Baustandard nach [18]	$U = 0,15 \text{ W/m}^2 \text{ K}$

4.1.3 Transparente Bauteile

In Anlehnung an der vorangegangenen Abschnitt werden die maximal zulässigen Wärmedurchgangskoeffizienten für transparente Bauteile aller relevanten Baustandards vorgestellt. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die Wärmedurchgangskoeffizienten von transparenten Bauteilen für Nichtwohngebäude. [13]

Sowohl bei den opaken, als auch bei den transparenten Bauteilen lassen sich die stets strenger werdenden Anforderungen gut erkennen. Eine Verbesserung dieser Werte ist aus physikalischer Sicht kaum noch möglich. Dadurch rückt der Fokus zur Realisierung energieeffizienter und nachhaltiger Gebäude vermehrt in die anlagentechnische Ausstattung von Gebäuden.

Tabelle 4.2: Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der transparenten Bauteile von Nichtwohngebäuden [18] [19]

Baustandard	Anforderungen an Wärmedurchgangskoeffizienten
EnEV 2009	$U_w = 1,90 \text{ W/m}^2\text{K}$
EnEV 2016	$U_w = 1,5 \text{ W/m}^2\text{K}$
PHI	$U_w \leq 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$
Baustandard nach [18]	$U_w = 0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$

4.2 Niedrigstenergiestandard 2021

Um den Anforderungen eines klimaneutralen Gebäudebetriebs zukünftig gerecht zu werden, spielen – neben den baukonstruktiven Randbedingungen – die gebäudetechnische Ausstattung sowie die regenerative Energieversorgung eine bedeutende Rolle. Den Baustandard anhand eines Referenzgebäudes in der Praxis zu verfestigen (wie es die aktuelle EnEV fordert) und dadurch effiziente Gebäude zu erzwingen, ist ein sinnvoller Ansatz. Jedoch erlauben spezifische Absolutwerte mehr Spielraum innerhalb des Gebäudeentwurfs. So können beispielsweise bei einer schlechten wärmeübertragenden Außenhülle mithilfe der technischen Installationen (z. B. Anschluss an ein Fernwärmenetz) die Zielwerte *Gesamtenergieeffizienz* sowie *geringer Primärenergiebedarf* dennoch erreicht werden. Zum weiteren Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit werden die Randbedingungen eines Niedrigstenergiestandards nach [18] herangezogen. Tabelle 4.3 zeigt die Anforderungen des angenommenen Niedrigstenergiestandards 2021.

Tabelle 4.3: Angenommener Niedrigstenergiestandard 2021 nach [18]

Gebäudehülle	Wärmedurchgangskoeffizient U
opake Bauteile	$U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$
transparente Bauteile	$U = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$ mit $U_g = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U_f = 0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$, $\psi = 0,045 \text{ W/mK}$
g-Wert der Verglasung	0,50
Wärmebrückenzuschlag	$U_{WB} = 0,01 \text{ W/m}^2\text{K}$
Luftwechselrate	$0,6 \text{ h}^{-1}$

4.2.1 Thermische Trägheit der Gebäudemasse

Werden die Anforderungen an transparente und opake Bauteile eingehalten, kann durch geeignete Wahl der eingesetzten Materialien eine Trägheit zur Übertragung von Heiz- bzw. Kühllasten in energieärmere Zeiten erreicht werden.

Mit steigender Masse und einer daraus resultierenden Trägheit der Bausubstanz trägt die Baukonstruktion zu einem Lastmanagement bei [20], das sich positiv auf den Energiebedarf eines Gebäudes auswirken kann. Gebäude mit einer großen thermischen Masse innerhalb der wärmedämmenden Gebäudehülle können zu einer Verbesserung des thermischen Komforts sowie zur Reduzierung des Energiebedarfs beitragen. Dabei gibt die thermische Masse im Heizfall langwellige Strahlung zeitversetzt an den Innenraum ab (Phasenverschiebung). Dadurch können Räume durch die thermische Trägheit der umgebenden Bauteile zeitversetzt sowohl beheizt, als auch gekühlt werden. Welches Potential die Gebäudemasse zur zeitversetzten Abgabe hat, hängt wesentlich vom Außenklima, von der Wahl der Materialien für die Baukonstruktion sowie vom Innenraumklima (definiert durch die Gebäudenutzung) ab. Leichte und schnell auskühlende Materialien eignen sich dabei weniger. Die Lage der thermischen Masse spielt eine entscheidende Rolle. Höhere Lastenabgaben an den Raum können erzielt werden, wenn sich die Masse auf der Innenseite der thermischen Gebäudehülle befindet. Jedoch ist der Einfluss auf die thermische Behaglichkeit und den Energieverbrauch relativ gering. Lediglich eine Verbesserung des Heizenergiebedarfs durch höhere thermische Lasten von 1,6 % konnten erzielt werden. Die Wirkung der solaren Energieeinträge, eine ausreichende Isolierung der Gebäudehülle sowie interne Lasten haben einen erheblich größeren Einfluss auf den Energieverbrauch. [21]

Bedingt durch die Trägheit von massiven Baumaterialien sowie der dichten Umfassungsfläche von Gebäuden, können vor allem extreme Außentemperaturen abgefangen werden. Werden Gebäude aus Materialien mit hohen spezifischen Wärmekapazitäten errichtet, so ist das Gebäude bzgl. seiner Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe träge und kann niedrige und hohe Außentemperaturen besser abpuffern. Die Wärmekapazität ist dabei von der Rohdichte des Baustoffes abhängig. Nachfolgende Tabelle 4.4 gibt einen Überblick über die gängigsten Baustoffe und deren physikalische Eigenschaften.

Tabelle 4.4: Bauphysikalische Eigenschaften von ausgewählten Baustoffen nach [22]

Baustoff	Rohdichte [kg/m ³]	spezifische Wärmekapazität c _p [J/kg K]	spezifische Wärmekapazität c _p [kJ/m ³ K]
Beton	1800 - 2400	1000	1800 - 2400
Leichtbeton	800 - 2000	1050	800 - 2000
Hochlochziegel	550 - 1000	1000	550 - 1000
Nutzholz	450 - 700	1600	720 - 1200
Wasser	997	4190	4177.43

Aus der Analyse der Baustoffe wird ersichtlich, dass Beton mit seinen physikalischen Eigenschaften am besten zu einer Trägheit des Gebäudes beitragen kann. Bezogen auf einen

Kubikmeter Baustoff hat Beton eine spezifische Wärmekapazität von bis zu 2400 kJ/m³K und somit eine doppelt so hohe spezifische Wärmekapazität wie Nutzholz.

In modernen Gebäuden, die auf eine maximale Nutzung von regenerativen Energien ausgelegt sind, muss der Schwerpunkt der Betrachtung auf die Frage gerichtet sein, wann Energie gewonnen und wann Energie verbraucht werden kann. Eine zunehmend fluktuierende Energieerzeugung erschwert die Dimensionierung der gebäudetechnischen Anlagen. Eine bedarfsgerechte Anlagentechnik in Kombination mit einem bedarfsseitigen Lastmanagement (Demand Side Management) über die Baukonstruktion bietet Potential zur Effizienzsteigerung und damit zur CO₂-Einsparung.

Das Ziel ist es, mithilfe eines Lastmanagements die Energie in Zeiten eines erhöhten solaren Angebots in Zeiten eines erhöhten Energiebedarfs der Gebäudenutzer zu übertragen. Durch die Trägheit eines Gebäudes und den Einsatz von thermischen Energiespeichern kann dies gewährleistet werden.

In Untersuchungen konnte bereits gezeigt werden, dass sowohl die Baukonstruktion, wie auch die Anlagentechnik in der Lage sind, Temperaturspitzen abzupuffern und so einen effizienteren Betrieb zu garantieren. [21] [23] [24] [25]

Hervorzuheben ist eine Untersuchung der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik aus dem Jahr 2014. Sie setzt sich mit dem Lastverhalten unterschiedlicher Gebäudetypen auf Basis eines regenerativen Energieversorgungssystems auseinander. Anhand von Typtagen wurden die kurz- und langzeitigen Lastmanagementpotentiale von 8 Gebäudemodellen untersucht. Es wird von einem Überangebot an elektrischer Energie aus regenerativen Energien ausgegangen, das der Netzbetreiber für geeignete Lastmanagementmaßnahmen heranziehen kann. Mithilfe von Wettervorhersagen werden die Gebäude entsprechend vorkonditioniert bzw. außer Betrieb genommen. Die ermittelten Zu- und Abschaltpotentiale zeigen, wann es sich lohnt, ein Gebäude aktiv am Lastmanagement teilhaben zu lassen. Dies ermöglicht dem Netzbetreiber eine schnelle Erfassung der Gebäude, die unter bestimmten Außenbedingungen am besten zum Lastmanagement zu-, bzw. abgeschaltet werden. In dieser Untersuchung wird davon ausgegangen, dass die Gebäudemasse als thermischer Speicher dient. Hierzu werden zwei Varianten – eine schwere (Speichermasse 147 Wh/m²K) und eine leichte (45 Wh/m²K) bautechnische Ausführung – miteinander verglichen. Es wird gezeigt, dass das schwere Gebäude mit seiner großen Speicherfähigkeit hohes Potential (>89%) zur Teilnahme an einem Lastmanagement (gegenüber einem Grundmodell) hat. Je mehr Speichermasse im Raum vorhanden ist, desto träger reagiert der Raum auf äußere Einflüsse und Änderungen. [26]

Um Angebot und Bedarf besser aufeinander abstimmen zu können und das regenerative Energieangebot besser nutzen zu können, bieten thermische Energiespeicher das Potential um das Lastmanagement der Baukonstruktion positiv zu unterstützen. Um einen klimaneutralen Gebäudebestand zu realisieren, sollte auf sensible thermische Speicher zurückgegriffen werden. Die Effizienz von unterschiedlichen Wärmeerzeugern kann durch den Einsatz von thermischen Pufferspeichern optimiert werden, da diese unabhängig vom Bedarf betrieben

werden können. Darüber hinaus eignen sie sich gut für die Einbindung von volatil gewonnener Energie (z. B. Solarenergie). Sie können Lasten aus der Umgebung effizient aufnehmen und zu einem späteren Zeitpunkt an den Raum abgeben. Da sie meist mit Wasser als Speichermedium umgesetzt werden, überzeugen sensible thermische Speicher aus einer ökologischen Sicht heraus. Eine leichte Umsetzung führt darüber hinaus zu niedrigen Installations- und Wartungskosten.

4.3 Effizienzsteigerung in der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden

Die Folge immer strenger werdender Baustandards (zunehmende Anforderungen an die Gebäudehülle, z. B. niedrige U-Werte) sind dichtere Gebäudehüllen, die einen Mehraufwand technischer Installationen, u.a. zur Abführung der Feuchtigkeit, bedeuten. So müssen heutzutage beispielsweise lufttechnische Installationen bereits im privaten Wohnungsbau installiert werden, um Bauschäden und Schimmelbildung zu vermeiden.

Trotz dieses technischen Mehraufwands gilt es jetzt mit innovativen, energieeffizienten und regenerativen Energieversorgungskonzepten die Weichen für einen klimaneutralen Gebäudebetrieb 2050 zu stellen. Um die Energiewende umsetzen zu können, ist ein Umdenken in der Wärmeerzeugung und Speicherung, der Wärmeverteilung und Wärmeübergabe in und am Gebäude notwendig. Nur durch Einsatz von regenerativ gewonnener Energie und den Verzicht auf fossile Energieträger kann eine Energie- bzw. Wärmewende realisiert werden. Bei durchschnittlichen Lebensdauern von 20 bis 30 Jahren von modernen Heizungsanlagen muss zeitnah gehandelt werden, um die Ziele der Bundesregierung bis 2050 einhalten zu können. Im Rahmen der Energiewende steigt die Frage nach energieeffizienten Wärme- und Kälteerzeugern sowie nach energieeffizienten und nachhaltigen Übergabesystemen an den Raum, die auf alternativen Energieversorgungssystemen basieren.

Zwar ist eine Vielzahl an Technologien zur effizienten Beheizung und Kühlung von Gebäuden vorhanden, aber erst die Kombination einzelner Technologien kann die Gesamteffizienz der Anlagen und somit des Gesamtgebäudes deutlich erhöhen. Im Folgenden werden die gängigsten Möglichkeiten zur Wärmeerzeugung und Speicherung, zur Wärmeverteilung und zur Wärmeübergabe vorgestellt, die dem Menschen im Innenraum eine wärmephysiologische Behaglichkeit bieten.

4.3.1 Wärmeerzeugung und Speicherung

Wärmeerzeuger wandeln Energieträger wie Erdgas, Heizöl, Strom oder Biomasse in Wärme um, die als Raumwärme und/oder Warmwasser dem Gebäudenutzer zur Verfügung gestellt wird. Bewertet wird der Einsatz der Energieträger über den Primärenergiefaktor. Dieser beträgt bei Heizöl und Heizgas je 1,1 und ist im Vergleich zu Holz (0,2) relativ hoch. Durch den Einsatz von Solarenergie und der Nutzung von Umgebungswärme kann dieser Faktor auf nahezu 0

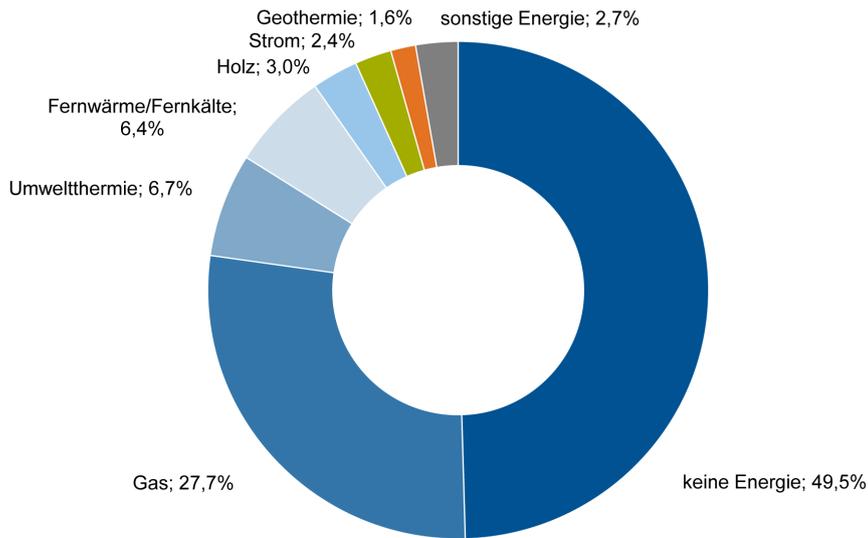
4.3 Effizienzsteigerung in der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden

reduziert werden. Bei Wärmepumpen wird lediglich die elektrische Energie zum Betrieb der Anlage mit einem Primärenergiefaktor betrachtet.

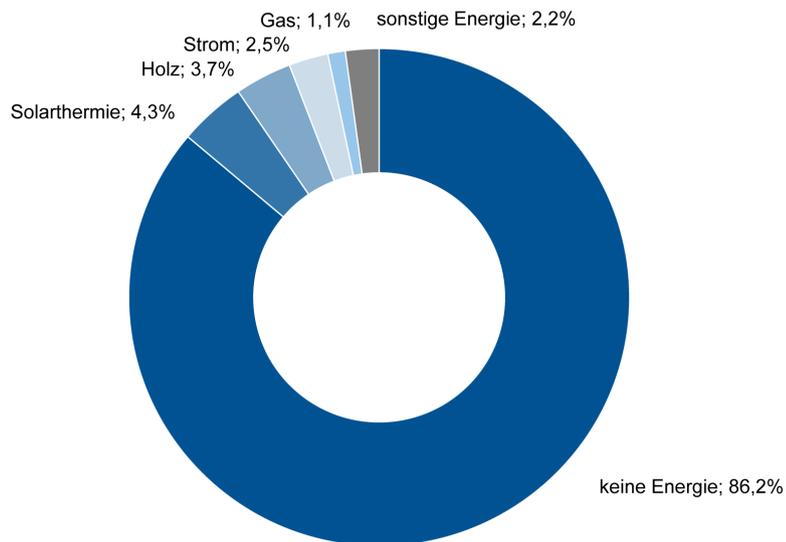
Bedingt durch den sinkenden Ölpreis der letzten Jahre wird wieder vermehrt auf Heizöl als Primärenergieträger im privaten Wohnungsbau zum Betrieb der wärmetechnischen Anlagen und zum Erreichen der nötigen operativen Raumtemperatur zurückgegriffen. Dieser Entwicklung muss zeitnah entgegengewirkt werden. Die EnEV fordert einen effizienten Betriebsenergiebedarf von konditionierten Gebäuden [13]. Da meist eine Energieversorgung, die ausschließlich auf regenerativen Energien basiert, nicht ausreichend ist, werden sog. Hybridsysteme umgesetzt. Diese stellen eine Kombination aus konventionellem Wärmeerzeuger (z. B. Gasbrennwertkessel) und einer regenerativen Energiequelle (z.B. Solarthermie) dar.

Abbildung 4.1 zeigt die primären und sekundären Heizenergieträger der genehmigten Nichtwohngebäude aus dem Jahr 2016. Unter primärem Heizenergieträger wird die übergeordnete Art des Energieträgers verstanden. Als sekundäre Heizenergie wird der unterstützende Energieträger verstanden. Eine dem Stand der Baupraxis entsprechende Heizungsanlage stellt ein Gasbrennwertkessel mit solarer Heizungsunterstützung dar. Hierbei entspricht der Gasbrennwertkessel dem primären Heizenergieträger (Gas). Die solarthermische Heizungsunterstützung stellt den sekundären Heizenergieträger (Solarthermie) dar. Ein Großteil der genehmigten Nichtwohngebäude benötigt keine Heizenergieversorgung. Dies ist im Wesentlichen auf die Art der Gebäude und deren Nutzung zurückzuführen (z.B. Lagerhallen, Garagen, etc.).

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude



(a) Primäre Heizenergie



(b) Sekundäre Heizenergie

Abbildung 4.1: Prozentualer Anteil der (a) primären und (b) sekundären Heizenergieträger der genehmigten Nichtwohngebäude 2016 nach [27]

Es ist gut erkennbar, dass Gas die bedeutendste Rolle bei der primären Heizenergieversorgung darstellt. Dies ist in erster Linie auf eine fast sichere Energieversorgung und entsprechende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen zurückzuführen. Darüber hinaus ist das deutsche Gasversorgungsnetz gut ausgebaut und eine Anbindung ist meist leicht realisierbar. Der Einsatz von Umweltthermie als zweithäufigster primärer Heizenergieträger überrascht an dieser Stelle, allerdings hat sich dieser Anteil innerhalb eines Jahres (von 2015 auf 2016) um ca. 150 % erhöht [27]. Ein Großteil der installierten Wärmepumpenanlagen fällt in diesen Bereich. Prozentual fast gleich stark vertreten ist die Anwendung von Fernwärme bzw. Fernkälte. Hierbei

4.3 Effizienzsteigerung in der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden

ist stets darauf zu achten, dass die transportierte Energie innerhalb des Fernwärmenetzes regenerativ gewonnen wurde. Holz, Strom und Geothermie finden kaum Einsatz in Nichtwohngebäuden zur primären Heizenergieerzeugung.

Abbildung 4.1 (b) lässt darauf schließen, dass ein Großteil der realisierten Bauten keine weitere (sekundäre) Heizenergie zur Beheizung der Gebäude benötigt und die primäre eingesetzte Energie ausreichend ist. In geringem Umfang werden Solarthermie, Holz und Strom zur Unterstützung der Heizungsanlage eingesetzt. Gas wird in erster Linie als Spitzenlastkessel zur Deckung von Lastspitzen von alternativen Energieversorgungssystemen (z.B. BHKW, Wärmepumpensysteme) eingesetzt.

Abbildung 4.2 zeigt die Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau für die Jahre 2000 bis 2016. Es ist erkennbar, dass die Wärme für Heizzwecke überwiegend aus Erdgas (inkl. Biogas) gewonnen wird. Dieser Anteil ist in den vergangenen Jahren zurückgegangen und Wärmepumpensysteme sowie Anbindungen an Fernwärmenetze haben an Bedeutung gewonnen. Trotz der ambitionierten Klimaschutzziele werden hauptsächlich Energieversorgungskonzepte auf Basis fossiler Energieträger in Neubauten installiert. Ein wesentlicher Grund für diese Entwicklung sind die niedrigen Preise für fossile Energieträger, die einem zügigen Ausbau an regenerativen Energieversorgungssystemen gegenüberstehen. Darüber hinaus wird in der Gesellschaft unter fossilen Energieträgern überwiegend eine sichere und zuverlässige Energieversorgung verstanden.

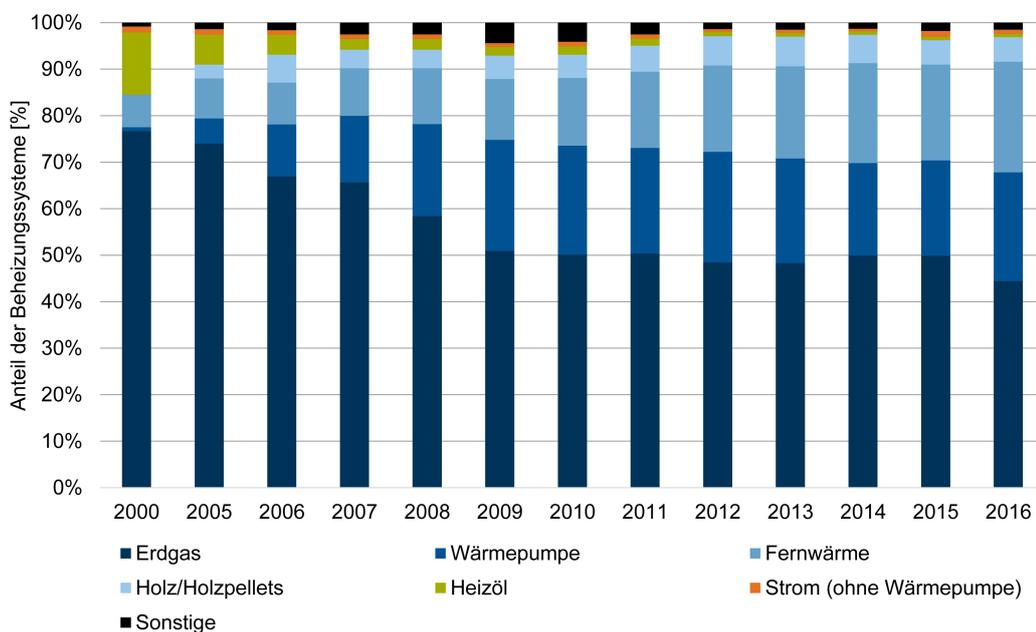


Abbildung 4.2: Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau in Deutschland von 2000 bis 2016 nach Daten des Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW)

Um eine umweltbewusste Beheizung von Innenräumen gewährleisten zu können, sollte auf einen maximalen Einsatz regenerativer Energien geachtet werden, bzw. auf den Einsatz von fossilen Energieträgern verzichtet werden. Dadurch steigt die Bedeutung von regenerati-

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

ven Energien für die Wärmeerzeugung an und führt zu energieeffizienter und nachhaltiger betriebenen Gebäuden.

Sämtliche Wärme- und Kälteerzeuger lassen sich mit Flächenheizungen/-kühlungen kombinieren. Die zentrale Schnittstelle in einer wassergeführten Heizungs- bzw. Kühlanlage stellt ein großzügig dimensionierter und hochisolierter Pufferspeicher dar. Dieser kann mit regenerativen Energien als Wärme- bzw. Kälteerzeuger kombiniert und in den Kontext der Nachhaltigkeitsziele gebracht werden. In Kombination mit einer bedarfsoptimierten Anlagentechnik sowie einer Leistungsanpassung an den Bedarf kann die Gesamteffizienz des Gebäudes erhöht werden.

Nachhaltige Energieversorgungssysteme basieren auf erneuerbarer Energie und müssen aufgrund der fluktuierenden Verfügbarkeit mit geeigneten Energiespeichersystemen unterstützt werden. Mit steigendem Anteil der erneuerbaren Energien werden Energiespeicher zukünftig zwingend erforderlich sein. Sie können die jahreszeitlichen und witterungsabhängigen Schwankungen der regenerativen Energieerzeugung ausgleichen und damit die Versorgungssicherheit gewährleisten. Dadurch lässt sich eine zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch umsetzen.

Die Ziele eines thermischen Wärme- bzw. Kältespeichers liegen im zeitlichen Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage, dem Abdecken von Lastspitzen, der hydraulischen Entkopplung der Systeme sowie der Versorgungssicherheit der Nutzer. Darüber hinaus sollen die Wärmeverluste des Speichers möglichst gering gehalten werden. [28]

Die einzelnen Komponenten einer gebäudetechnischen Anlage aufeinander abzustimmen und ein einheitliches Temperaturniveau zu erreichen, ist eine wesentliche Voraussetzung zur Umsetzung von Niedrigst- bzw. Plusenergiegebäuden. Ist das Temperaturniveau der Wärmequelle besser auf das Temperaturniveau des Verbrauchers angepasst, sinkt der Einsatz von Exergie (Teil der Gesamtenergie, der Arbeit verrichten kann), wodurch der Anteil der enthaltenen Anergie (Teil der Gesamtenergie, der keine Arbeit verrichten kann) steigt. [29]

4.3.2 Thermische Energiespeicher

Obwohl der Wärmebedarf von Gebäuden zukünftig sinken wird (bedingt durch dichtere Gebäudehüllen, höhere interne Lasten, globale Erwärmung), wird der Bedarf an thermischen Energiespeichern (TES) steigen, da zunehmend Energie aus erneuerbaren Energien gewonnen wird, und damit die Diskrepanz aus Angebot und Nachfrage zunehmen wird. [30]

Darüber hinaus weisen Thermischer Energiespeicher (TES) gute Wärmeübertragungseigenschaften sowie hohe Wärmekapazitäten auf. Durch den Einsatz von ungiftigen Materialien und Wärmeträgermedien ist ein umweltfreundlicher Betrieb von gebäudetechnischen Anlagen möglich. Zusätzlich sind sie leicht verfügbar und kostengünstig umsetzbar. [31]

Der Speicherbedarf in der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden erlaubt es, Systeme mit niedrigeren Speicherkapazitäten einzusetzen. Aus diesem Grund und aufgrund von Nachhaltigkeitsanforderungen werden ausschließlich sensible TES betrachtet.

4.3 Effizienzsteigerung in der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden

TES werden grundsätzlich in drei Arten unterschieden (vgl. Tabelle 4.5). Sensible TES ändern beim Zu- oder Abführen von Energie ihren Aggregatzustand nicht. Sie ändern ausschließlich ihre Temperatur. Latentwärmespeicher ändern ihren Aggregatzustand, wobei hierbei die Temperatur des Speichermediums konstant bleibt. Die dritte Art der thermischen Energiespeicherung sind thermochemische Energiespeicher. Diese setzen durch endo- bzw. exotherme chemische Prozesse Wärme frei, die genutzt werden kann [32]. Durch den Paradigmenwechsel von fossilen Wärmeträgern zu erneuerbaren Energieträgern wird die Bedeutung von TES ansteigen. Sensible Wärmespeicher mit dem Speichermedium Wasser ermöglichen hierbei gegenüber latenten thermochemischen Energiespeichern einen einfachen und ökologisch unbedenklichen Einsatz.

Tabelle 4.5: Unterteilung thermischer Energiespeicher [32] [30]

thermische Energiespeicher						
sensibel		latent			thermochemisch	
fest (z. B. Gestein)	flüssig (z. B. Wasser)	fest-flüssig	flüssig-gasförmig	fest-fest	Sorption	chemisch reversibel

Wasser ist in seiner Handhabung und seiner Beschaffenheit ein wichtiges Medium in der Gebäudetechnik. Die Temperaturbereiche von 0–90 °C decken alle relevanten Systemtemperaturen der Gebäudetechnik ab. Geeignete Stoffe, die einen annähernd ähnlichen Temperaturbereich abdecken sind teuer oder nicht vorhanden. Im Gebäudesektor, exklusive der Warmwasserversorgung, kann Wasser als Speicher- und Trägermedium für Heiz- und Kühlzwecke eingesetzt werden. Zum effizienten Betrieb von Fußbodenheizungen werden Temperaturen zwischen 30–40 °C benötigt (Deckenkühlungen 10–25 °C).

Wasser ist in der Lage Wärme aufzunehmen und kann die Wärme bei entsprechender Isolierung und ausreichendem Speichervolumen lange zwischenspeichern. Dies stellt die Grundvoraussetzung für den Einsatz als Energiespeicher zur Beheizung und Kühlung von Gebäuden dar. Im Vergleich zu vielen anderen Medien im gebäudetechnischen Umfeld ist Wasser – im Gegensatz zu Luft – ein gut einsetzbares Speichermedium (vgl. hierzu Tabelle 4.4).

Um einen Vergleich herstellen zu können, werden Bewertungskriterien nach [2] herangezogen. Wesentlicher Vorteil von Wasser als Speichermedium ist eine hohe Lebensdauer bei einer großen Anzahl an Lade- und Entladevorgängen in Kombination mit einem geringen Wartungsaufwand. Die Anschaffung mit vergleichbar geringen spezifischen Kosten (pro kWh) sowie eine einfache Installation und Bedienung sprechen für die Wahl dieses Speichermediums. Die gespeicherte Wärmemenge ΔQ ist hierbei abhängig von der spezifischen Wärmekapazität c , der Masse m des Speichermediums sowie der Temperaturdifferenz ΔT . Die folgende Gleichung 4.1 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

$$\Delta Q = m * c * \Delta T \quad (4.1)$$

Wasser besitzt eine spezifische Wärmekapazität von $c = 4175 \text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$. Um diese Zahl vergleichbar zu machen erscheint die spezifische Wärmekapazität von Beton mit $c = 1672 - 2074 \text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$ verhältnismäßig gering (vgl. hierzu Tabelle 4.4) [32]. Aus diesem Grund sollte im nachhaltigen Bauprozess der Fokus auf der sensiblen thermischen Energiespeicherung liegen, die im Idealfall positiv von der thermischen Masse der Baukonstruktion unterstützt werden kann. Je größer das Volumen eines sensiblen TES, desto längere Speicherzeiten pro m^3 sowie höhere Speicherkapazitäten können erzielt werden [32].

Alternative Speichertechnologien (z. B. elektrochemische Speicher, mechanische Speicher) sind in ihrer Anschaffung teurer und bieten einen unzuverlässigen Betrieb. Meist sind ihre Lebensdauern kurz und haben eine niedrige Effizienz. Die schlechte Integration in ein Gebäudeenergiekonzept sowie die Kopplung mit einem Energieversorgungsnetz stellt große Schwierigkeiten bei der Einbindung von Speichertechnologien dar. Darüber hinaus sind viele Technologien nicht oder nur schwer skalierbar. In diesen Punkten hat Wasser als Speichermedium klare Vorteile. Es ist kostengünstig, umweltverträglich, leicht zu beschaffen, quasi unbegrenzt verfügbar, hat eine unbegrenzte Lebensdauer und ist leicht skalierbar.

Jedoch gibt es einige Faktoren, die gegen den Einsatz von thermischen, wasserbeladenen Speichern sprechen. So ist der spezifische Platzbedarf von thermischen Speichern zur Deckung der Bedarfe relativ groß (im Vergleich zu elektrochemischen oder chemischen Speichern). Darüber hinaus ist die Selbstentladung von Wasser bei einem nicht ausreichend isolierten Behälter vergleichsweise hoch. Eisspeichertechnologien machen sich diesen Effekt zum Nutzen, indem das Medium über hohe thermische Verluste über einen längeren Zeitraum flüssig bleibt und so länger als Wärmequelle zur Verfügung steht.

Anmerkung: Auf die Wärmebereitstellung auf Basis elektrischer und lufttechnischer Heizsysteme wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Effizienter – aber ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet – ist der Einsatz von Wärmepumpen. Diese können ihr volles Potential allerdings nur aufzeigen, wenn die zum Betrieb der Pumpe benötigte elektrische Energie zu 100 % regenerativ erzeugt wird. Auch die Nutzung von Synergieeffekten von Liegenschaften kann zukünftig in Form von Anergie- und Nahwärmenetzen eine sinnvolle Alternative zur Beheizung von Gebäuden sein.

4.3.3 Wärmeverteilung

Die Wärmeverteilung innerhalb eines Gebäudes (vom Wärmeerzeuger bis zur Wärmeübergabe) wird heutzutage als Zweirohrleitungssystem ausgeführt. Die Planung der Leitungen ist so auszuführen, dass an allen Wärmeübergabestationen dieselbe Vorlauftemperatur abgerufen werden kann. Mithilfe von effizienten drehzahlgeregelten Pumpen wird das Wärmeträgermedium im Gebäude verteilt. Um eine energieeffiziente Verteilung gewährleisten zu können, werden die eingesetzten Kupfer-, Stahl-, Edelstahl- oder Polyethylenrohre zusätzlich gedämmt,

4.3 Effizienzsteigerung in der Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden

um die Wärmeverluste einzuschränken. Mithilfe eines Bypasses am Wärmeerzeuger sowie am Pufferspeicher wird die Restwärme des Rücklaufs dem Vorlauf zugeführt und somit die Effizienz der Verteilung und der Kompletanlage verbessert.

Mit zunehmender Entfernung der Wärmeübergabe zur Pumpe steigt der Druckverlust bedingt durch Rohrreibungsverluste, Formstücke, Ventile, etc. und ein hydraulischer Kurzschluss kann die Folge sein. Um eine gleichmäßige Verteilung des Heiz- bzw. Kühlwassers sicher zu stellen, muss regelmäßig ein hydraulischer Abgleich der druckführenden Anlage durchgeführt werden. Nur so kann ein effizienter und energiesparender Betrieb der Anlage garantiert werden.

4.3.4 Wärmeübergabe

Bedingt durch integrative Planungsansätze sowie einen stetig verbesserten Wärmeschutz sinken die Heizlasten von Gebäuden. Es ergeben sich Niedrigtemperatursysteme als Standard sowohl im Neubau als auch im Bestandsbau. Flächenheizungen und -kühlungen, die deutlich niedrigere Systemtemperaturen benötigen als herkömmliche Radiatoren, bieten ein geeignetes System zur nachhaltigen Wärmeübergabe an den Raum.

Nach der Verteilung der Wärme innerhalb des Gebäudes wird die Wärme mithilfe von Radiatoren, Konvektoren oder bauteilintegrierten Flächenheizungen an den Raum abgegeben. In Neubauten werden, je nach Nutzungsart, überwiegend Flächenheizungen (z.B. Fußbodenheizungen) umgesetzt. Diese bieten den Vorteil, dass sie neben einem effizienteren Betrieb einen vertikalen Temperaturverlauf im Aufenthaltsbereich vorweisen und somit zu einem behaglicheren Innenraumklima führen. Dieses System ist allerdings träge und ein schnelles Aufheizen bzw. Abkühlen des Raumes ist nicht möglich. In diesem Fall eignen sich herkömmliche Konvektoren zum Heizen bzw. Splitgeräte zum Kühlen besser. [33]

Fußbodenheizungen stellen eine umweltfreundliche und nachhaltige Variante der Wärmeübergabe an den Raum dar. Es sind niedrigere Vorlauftemperaturen sowie niedrigere Raumtemperaturen bei einer gleichzeitig höheren Behaglichkeit realisierbar. Dadurch können Fußbodenheizungen gegenüber Radiatorenheizungen wirtschaftlicher und energieeffizienter betrieben werden. Gleiches gilt für Flächenkühlelemente. Die niedrigen, dem Aufenthaltsbereich angenäherten Vorlauftemperaturen können auch hier deutlich zur Effizienzsteigerung beitragen. Große Wärme- bzw. Kälteübergabeflächen bieten einen höheren Komfort durch eine natürliche Strahlungswärme. Darüber hinaus sind beide Systeme gut für die Kombination mit regenerativen Energien (Solarthermie, Umweltwärme in Kombination mit einer Wärmepumpe) geeignet. Die niedrigen Temperaturspreizungen und die daraus resultierenden gleichmäßigen Wärmeabgaben an den Raum führen zu einer angenehmen thermischen Behaglichkeit für den Menschen. Das physikalische Prinzip der Wärmestrahlung erhöht das Wohlbefinden des Menschen, da er selbst stets Wärme an seine Umgebung abstrahlt und mit ihr im Austausch steht. So werden die physiologischen Anforderungen des Menschen optimal unterstützt sowie die Wärmespeicherpotentiale der Baukonstruktion thermisch optimiert (Reduzierung von Wärmebrücken, etc.). [34][35]

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

Ähnlich wie bei der Heizwärme verhält es sich bei der Kühlung eines Raumes. Hier wird mithilfe von Kühldecken dem Raum Wärme entzogen. Bedingt durch thermische Verhältnisse und Behaglichkeitsbedingungen des menschlichen Körpers werden kühlende Decken angenehmer empfunden als kühlende Fußböden. Auch hier bietet ein vertikaler Temperaturverlauf Vorteile zur Erlangung der Innenraumbehaglichkeit durch eine gleichmäßige Kühlwärmeabgabe an den Raum. Ziel ist es, bei Kühlanforderungen den zu kühlenden Raum möglichst schnell und effizient auf die Zieltemperatur abzukühlen. Da Flächenkühlelemente die Behaglichkeit im Raum erhöhen, wird vermehrt auf träge Deckenkühlelemente und Bauteilaktivierungen gesetzt. Damit können Zugscheinungen vermieden werden. Der Einsatz von raumluftechnischen Anlagen erfordert einen höheren energetischen Aufwand.

Tabelle 4.6 zeigt die Kennwerte von thermisch aktiven Bauteilen sowie ihre maximal zulässigen Oberflächentemperaturen. Hierbei handelt es sich um normierte Werte und Empfehlungen des Verein Deutscher Ingenieure (VDI).

Tabelle 4.6: Thermische Kennwerte für Flächenheizungen/-kühlungen nach [36] und [37] (in Anlehnung an [35])

	Oberflächentemperatur ϑ_F am Bauteil in °C		Maximale spezifische Leistung q_H in W/m ²	
	maximal beim Heizen	maximal beim Kühlen	Heizung bei ϑ_i 20 °C	Kühlung bei ϑ_i 26 °C
Boden	29	19	ca. 100	ca. 45
Wand	40	18	ca. 160	ca. 65
Decke	29	18	ca. 60	ca. 85

Um die geforderte Oberflächentemperatur im Heizfall nicht zu überschreiten, wird eine maximale Vorlauftemperatur von 35 °C empfohlen. Beim Einsatz von Kühldecken darf eine Vorlauftemperatur von 16 °C nicht unterschritten werden, da es sonst zur Bildung von Tauwasser und somit zu Feuchtigkeit im Bauteil kommen kann.

4.3.5 Anlagentechnische Regelung

Die genaue Abstimmung von Wärmeerzeugung und -speicherung, Wärmeverteilung und Wärmeübergabe benötigt eine ausgereifte mess-, steuer- und regelungstechnische Ausführung der Anlage. Eine bedarfsgerechte Regelung des Heizsystems in Abhängigkeit der Außentemperatur entspricht heute dem Stand der Baupraxis. Die korrekte Dimensionierung und gegenseitige Abstimmung der einzelnen Komponenten ist für einen effizienten Betrieb erforderlich und ergibt erst durch korrekte Steuerung ein energiesparendes Gesamtsystem.

Durch Messung der Temperaturen im solaren Wärmeerzeugerkreis und im TES werden die Pumpen erst eingeschaltet, wenn eine Einschalttemperaturdifferenz überschritten wurde. Diese Temperaturdifferenzregelung gibt erst ein Signal an die Pumpe, sobald die Temperatur am Kollektor die Temperatur im unteren Bereich des TES um einige Grad überschreitet (ca. 8 bis

4.4 Effiziente Energiegewinnung am Gebäude und Einsatz alternativer Energieträger

10 K). Sobald sich diese beiden Temperaturen wieder annähern, wird die Pumpe abgeschaltet (Ausschalttemperaturdifferenz). Die Pumpen werden ebenfalls abgeschaltet, sobald eine maximale Speichertemperatur erreicht wurde. Je niedriger diese maximale Speichertemperatur definiert ist, desto höher kann der solare Deckungsanteil der Solarenergie sein. Daraus resultiert ein geringerer Anteil an Hilfsenergie zur Erlangung der geforderten Temperaturen im TES. [28]

Wird ein solarer Kälteerzeugerkreis mit TES realisiert, verhält es sich mit den Temperaturen entgegengesetzt zum Wärmeerzeugerkreis. Ist keine solare Einstrahlung auf der Absorberfläche messbar, werden die Pumpen eingeschaltet. Eine weitere Bedingung für den Betrieb der Pumpen ist die höhere Temperatur im oberen Drittel des TES gegenüber der Austrittstemperatur, bzw. Umgebungstemperatur am Absorber.

Nachtabenkungen der Heizungsanlage bieten weiteres Einsparpotential zu einem energieeffizienten Gebäudebetrieb. Hierbei wird die Heizungsanlage im Verteilerkreislauf in den Nachtstunden (22:00 - 06:00 Uhr) teilweise oder gar komplett abgeschaltet. Hochwärmegeämmte Gebäude erlauben eine längere Absenkung der Heizungsanlage, da sie im Vergleich zu schlechter isolierten Gebäuden geringere Transmissionswärmeverluste an die Umgebung aufweisen und somit die Wärme länger im Gebäude gehalten werden kann.

4.4 Effiziente Energiegewinnung am Gebäude und Einsatz alternativer Energieträger

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Potentiale solarer Technologien eingegangen, die zu einer nachhaltigen und regenerativen Energiegewinnung (Heizen und Kühlen) beitragen können. Hierbei steht die effiziente Energiegewinnung am Gebäude im Fokus. Es werden solare Technologien zur Gebäudebeheizung und Gebäudekühlung vorgestellt sowie deren Einbindung in ein Gesamtkonzept angesprochen.

4.4.1 Solare Potentiale für Gebäude und passive Solarenergienutzung

Auf einer horizontalen Empfängerfläche in Süddeutschland trifft jährlich im Mittel eine Globalstrahlung von 1100 kWh/m^2 (Solarkonstante $E = 1367 \text{ W/m}^2$ [38]) auf [39]. Die vorhandene solare Einstrahlung auf der Erdoberfläche ist mehr als ausreichend für die weltweite energetische Wärmeversorgung von Gebäuden [38] [40]. Auch in Deutschland kann ein Gebäude ausschließlich mit solarer Wärme versorgt werden. Regionale Unterschiede beeinflussen die Nutzung von solarer Einstrahlung. Darüber hinaus ist das Strahlungsangebot der Sonne stark abhängig von der Jahreszeit, Tageszeit, Trübung der wolkenlosen Atmosphäre sowie den Bewölkungsverhältnissen [28].

Die auf der Erdoberfläche auftreffende Globalstrahlung setzt sich aus einem direkten und einem diffusen Strahlungsanteil zusammen. Der diffuse Strahlungsanteil ist abhängig vom

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

Bewölkungsgrad. Um den Wirkungsgrad einer solarthermischen oder photovoltaischen Anlage zu erhöhen, werden die Kollektorflächen der Sonne entgegen aufgeständert. So ist die Bestrahlungsstärke auf der Kollektorfläche am größten [28] [41].

Die Verteilung der Globalstrahlung in Deutschland nimmt gegen Süden merklich zu. Bei der Betrachtung der Globalstrahlung am Standort München wird deutlich, dass die Einstrahlung in den Sommermonaten deutlich höher ist als in den Wintermonaten (vgl. Abbildung 4.3 (a) und (b)). Dargestellt werden in diesen Abbildungen die Globalstrahlung auf einer horizontalen Fläche (schwarze Linie), auf einer 45° nach Süden geneigten Fläche (graue Linie) sowie die Außentemperatur am Standort (blaue Linie). Es ist gut erkennbar, dass neben der höheren Außentemperatur im Monat Juli auch die Globalstrahlung sowohl auf der horizontalen, wie auch auf der geneigten Fläche zunehmen. Vor allem im Januar lässt sich gut erkennen, dass die Einstrahlung auf einer geneigten Fläche (graue Linie) deutlich höher ist als auf einer horizontalen Fläche.

4.4 Effiziente Energiegewinnung am Gebäude und Einsatz alternativer Energieträger

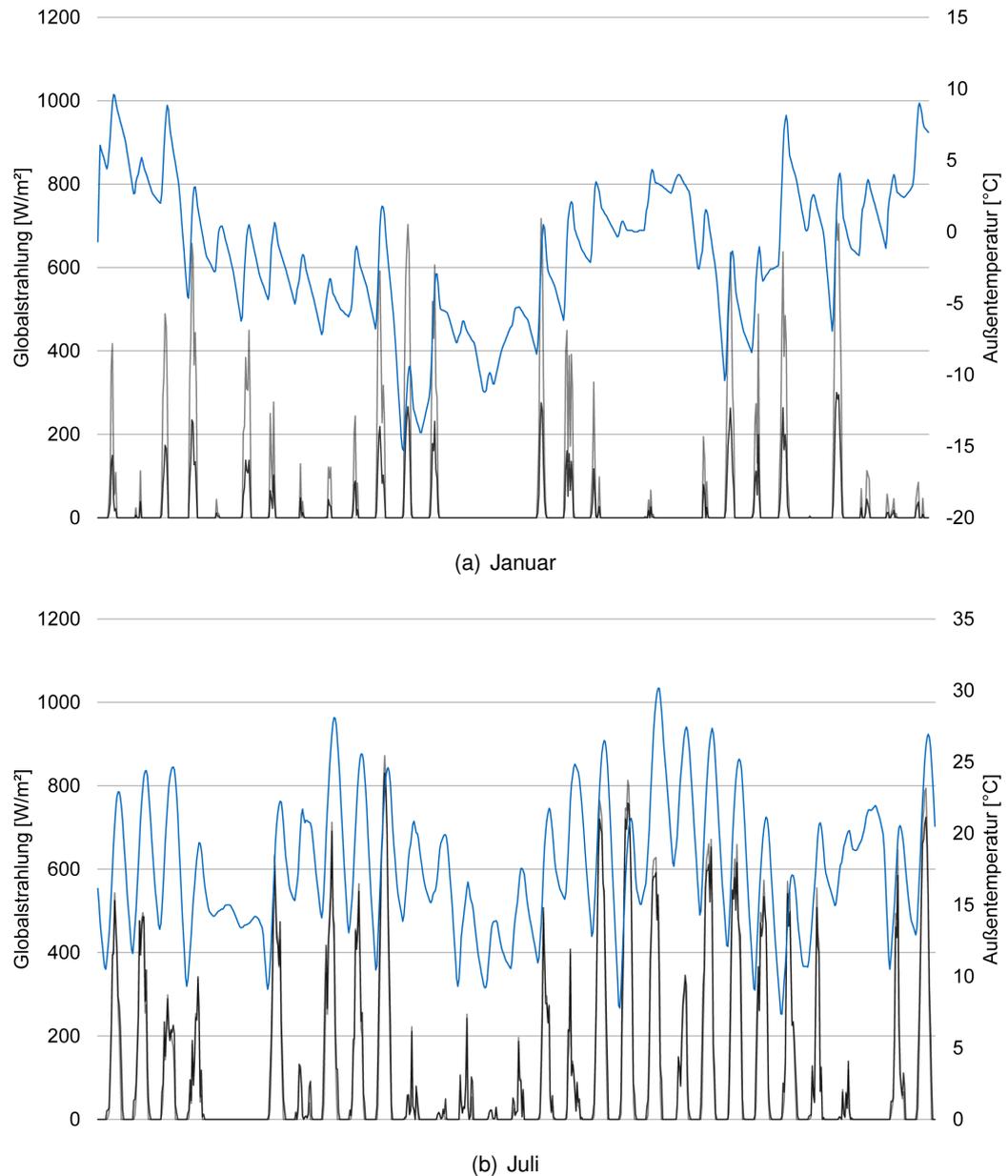


Abbildung 4.3: Auftreffende Globalstrahlung auf einer horizontalen Fläche (schwarz) und 30° geneigter Fläche (grau); Außentemperatur am Standort München-Riem (blau)

Mit heutiger Technologie ist es möglich, auch aus niedrigen solaren Einstrahlungen Energie zur Beheizung eines Gebäudes zu ziehen. Ob diese Einstrahlung ausreichend ist, hängt von den Dimensionen sowie der Wahl der gebäudetechnischen Anlagen ab. Sind die Flächen nicht ausreichend, um ein Gebäude komplett mit solar gewonnener Wärme zu versorgen, dient die installierte Fläche zur Heizungsunterstützung und ein weiterer Energieträger kommt zum Einsatz.

Die bereits installierte Fläche von solarthermischen Anlagen in Deutschland ist mit 0,74 Mio m² bis Ende 2016 [42] bereits recht hoch, dient aber in erster Linie zur Heizungsunterstützung.

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

Die jährlich neuinstallierte Kollektorfläche ist seit 2011 stetig gesunken, erreicht aber im Jahr 2016 immer noch eine Fläche von 740.000 m² (vgl. Abbildung 4.4).

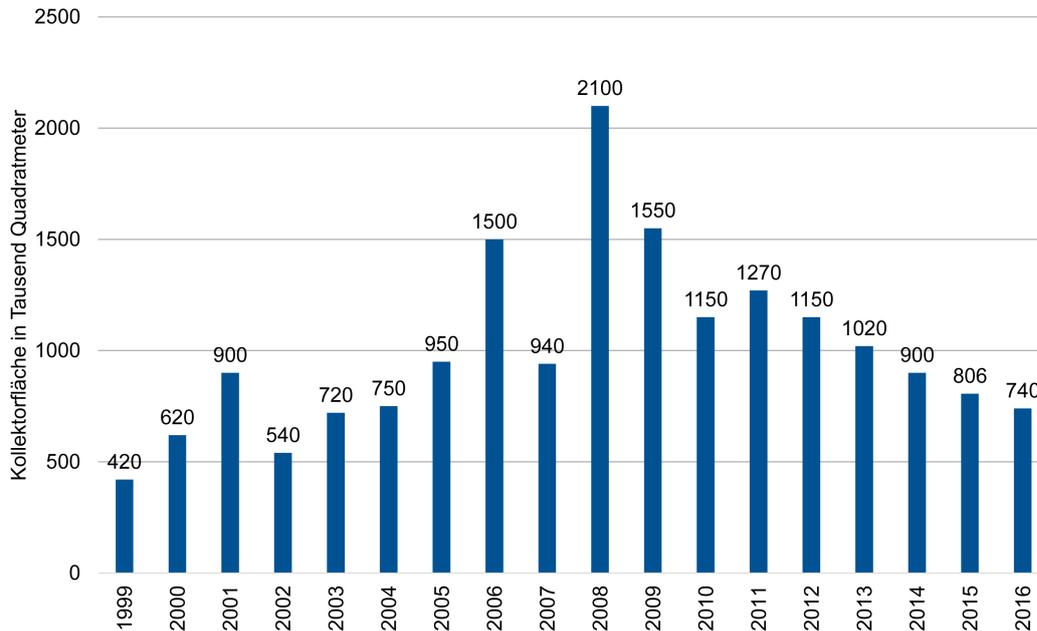


Abbildung 4.4: Jährlich neu installierte Kollektorfläche von Solarthermieanlagen in Deutschland [43]

Diese Tendenz ist darauf zurückzuführen, dass die staatlichen Subventionierungen reduziert wurden und gleichzeitig die Energiekosten für Heizöl deutlich gesunken sind. Um jedoch ein nachhaltiges Energieversorgungskonzept umsetzen zu können, muss auf solare Technologien zurückgegriffen werden. Sowohl für die Beheizung (Solar Heating) sowie für die Kühlung (Solar Cooling) eines Gebäudes.

Neben den technischen Installationen besteht die Möglichkeit, solare Energie passiv zu nutzen. Die einfachste Variante ist es, die solare Einstrahlung durch transparente Bauteile als Wärmequelle zu nutzen. Je nach Verglasungsart können hohe solare Gewinne die Energieeffizienz der gebäudetechnischen Anlagen positiv beeinflussen.

Darüber hinaus können Bauteile durch die eintreffende kurzwellige Solarstrahlung Energie absorbieren, was zu einer Erwärmung der bestrahlten Bauteile führt, die zu einem späteren Zeitpunkt an den Raum abgegeben werden kann (Solarwand). Wärmeschutzverglasungen mit einer hohen Lichtdurchlässigkeit bieten hierbei einen Vorteil, da sie die kurzwellige Strahlung in den Innenraum zulassen und somit die innenliegenden Bauteile die Strahlung absorbieren können. Die Höhe und der Zeitpunkt der Abgabe der aufgenommenen Energie ist abhängig von der spezifischen Wärmekapazität des Bauteils sowie von seiner Dichte und Wärmeleitfähigkeit. Auch die Temperaturdifferenz zwischen dem Innen- und Außenraum beeinflusst die Energieaufnahme und -abgabe. [44]

4.4.2 Solar Heating

Circa 26% des gesamten Endenergieverbrauchs der Bundesrepublik entfallen auf private Haushalte [3]. Die Beheizung von Gebäuden (70%) und die Versorgung mit Warmwasser (14%) benötigen hiervon prozentual einen großen Anteil. Es wird das Ziel verfolgt, einen Großteil der benötigten Energie mithilfe solar gewonnener Energie zu decken. Abbildung 4.5 zeigt den Endenergieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen in Deutschland aus dem Jahr 2016.

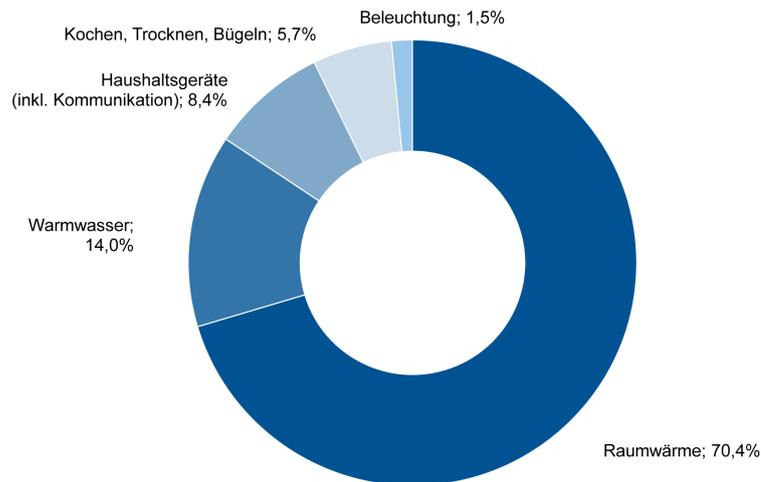


Abbildung 4.5: Endenergieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen in Deutschland 2016 nach Anwendungsbereich (nach [45])

Da davon auszugehen ist, dass der Ölpreis zukünftig durch die Endlichkeit fossiler Energieträger steigen wird und das Ziel verfolgt wird, den CO₂-Ausstoß weiter zu senken, spielt die solare Wärmeerzeugung künftig eine tragende Rolle und bietet Potential, Gebäude nachhaltig mit Wärme zu versorgen. Bedingt durch dichtere Gebäudehüllen und steigende interne Lasten bedarf es keiner hohen Auslegungstemperaturen zur Beheizung eines Gebäudes. Durch Bauteilaktivierungen sind Vorlauftemperaturen von maximal 35 - 40 °C ausreichend, die verhältnismäßig leicht durch Solarkollektoren erreicht werden können. Der Einsatz von regenerativer Energie zur nachhaltigen Energieversorgung von Gebäuden ist demnach zwingend erforderlich, um Niedrigstenergiegebäude realisieren und die Energiewende erfolgreich umsetzen zu können.

Die zur Verfügung stehende solare Einstrahlung möglichst effizient in Wärme umzuwandeln, ist das Ziel jeder solarthermischen Kollektoranlage. Mithilfe einer dunkel beschichteten Platine wird die Wärme absorbiert und auf das Trägermedium Wasser übertragen. Hierbei gilt nachfolgende Formel 4.2 der Energieerhaltung. Diese besagt, dass die Summe aus absorbiertes (α), reflektierter (ρ) und transmittierter (τ) Strahlung gleich der auftreffenden Globalstrahlung auf einer Fläche ist.

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (4.2)$$

Nach dem Kirchhoff'schen Gesetz ist der Absorptionsgrad α eines Körpers gleich seinem Emissionsgrad ϵ (vgl. Formel 4.3). [31] [46]

$$\alpha = \epsilon \quad (4.3)$$

Da Solarkollektoren keine Strahlung transmittieren ($\tau = 0$), unterteilt sich die einfallende Strahlung auf einen reflektierten und einen absorbierten, bzw. emittierten Teil. Ziel hierbei ist, den reflektierenden Teil möglichst gering zu halten, sodass ein Großteil der absorbierten Strahlung in Wärme umgewandelt werden kann. Daraus lässt sich folgender Zusammenhang ableiten.

$$\epsilon + \rho = 1 \quad (4.4)$$

Die Wärme, die durch das Wärmeträgermedium dem Kollektor entnommen wird, kann durch Formel 4.5 ermittelt werden. Diese Nutzwärme \dot{Q} ist von der Masse, die durch den Kollektor fließt, dessen spezifischer Speicherkapazität sowie der Temperaturspreizung zwischen Ein- und Auslass abhängig.

$$\dot{Q} = \dot{m} * c_p * \Delta T \quad (4.5)$$

Der Wirkungsgrad von solarthermischen Kollektoren kann über die Formel 4.6 ermittelt werden. Dieser setzt sich aus dem Verhältnis der Nutzwärme \dot{Q} zur einfallenden Globalstrahlung G_G zusammen.

$$\eta = \frac{\dot{Q}}{G_G} \quad (4.6)$$

Über ein gedämmtes Rohrnetz wird die gewonnene Wärme zu einem thermischen Speicher transportiert. Mithilfe eines Wärmetauschers wird die Wärme meist im unteren Bereich des Speichers an das Speicherwasser übertragen. Das sich abkühlende Medium fließt, nach ein paar Schleifen im Tank, wieder zurück zum Kollektor, um dort erneut Wärme aufzunehmen. Bedingt durch den thermischen Auftrieb von warmem Wasser steigt das erwärmte Medium innerhalb des Tanks nach oben. Im oberen Bereich des Speichertanks befindet sich eine Entnahmestelle, von der aus über einen Wärmetauscher Wärme an den Heizkreislauf übergeben wird. Der Heizkreislauf befördert das Heizmedium mithilfe von Pumpen zu den Räumen, in denen die Wärme benötigt wird und gibt diese über Konvektoren, Radiatoren oder Fußbodenheizungen an den Raum ab. Das abgekühlte Heizmedium wird wieder zurück zum Speichertank geführt und der Kreislauf beginnt von vorne (vgl. Abbildung 4.6). [28]

4.4 Effiziente Energiegewinnung am Gebäude und Einsatz alternativer Energieträger

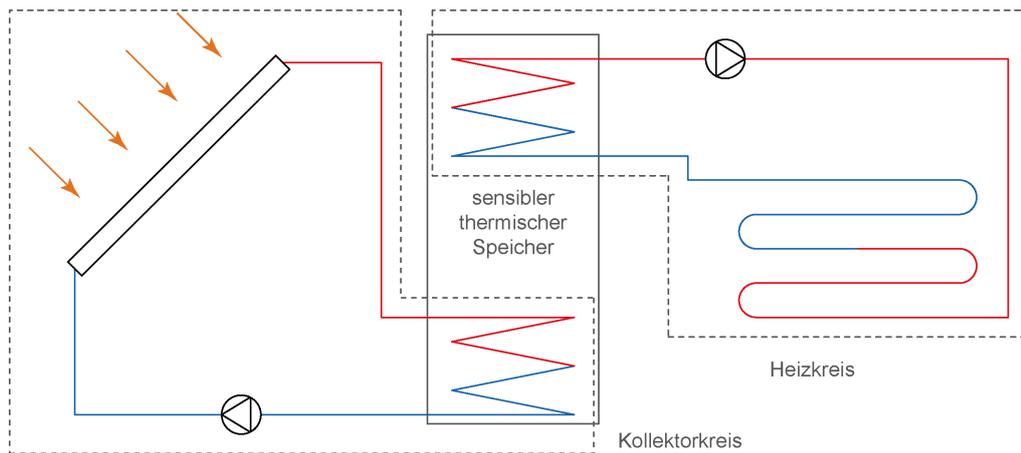


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips einer solarthermischen Anlage zum Betrieb einer Fußbodenheizung

Um bei vorherrschenden Minusgraden ein Vereisen der solarthermischen Anlagen zu vermeiden, wird auf der Kollektorseite ein Wasser-Glykol-Gemisch eingesetzt. Zum möglichst wirtschaftlichen Betrieb der Anlage werden außerdem verschiedene Messsensoren installiert, die ein Ein- und Ausschalten der Pumpen hervorrufen. Ausschlaggebend hierfür sind die Temperaturunterschiede zwischen der Kollektorfläche und dem Speicher (Temperaturdifferenzregelung) sowie die Einstrahlungswerte auf der Kollektorfläche. Liegt die Temperatur am Kollektor beispielsweise 8–10 Kelvin über der Temperatur im unteren Bereich des Speichertanks, werden die Pumpen in Betrieb genommen und es resultiert eine Erwärmung des Speichers (Einschalttemperaturdifferenz). Fällt diese Temperaturdifferenz unter 5 Kelvin, z.B. bedingt durch eine ausreichende Erwärmung des Speichers oder sich ändernde Wetterverhältnisse, werden die Pumpen wieder ausgeschaltet (Ausschalttemperaturdifferenz). Je niedriger die Warmwassersolltemperatur, desto höher ist die Deckung der benötigten Wärme über solarthermische Anlagen. [28]

Es werden hauptsächlich sensible TES in solarthermische Systeme integriert. Bei der sensiblen Speicherung thermischer Energie handelt es sich um eine fühlbare Temperaturänderung des Speichermediums (Temperaturerhöhung des Wassers). Latentwärmespeicher hingegen speichern Energie im Phasenübergang von fest zu flüssig, bzw. von flüssig zu fest. [30]

Sensible TES werden überwiegend mit Wasser als Speichermedium befüllt. Dies hat den Vorteil, dass Wasser leicht verfügbar ist, keine toxischen Eigenschaften aufweist und zudem eine hohe spezifische Wärmekapazität (4,182 kJ/(kgK) bei 20 °C) hat. Die dem TES zugeführte Energie sollte möglichst verlustfrei über einen gewissen Zeitraum gespeichert werden. Hierzu ist eine Wärmedämmung des TES nötig, die im Idealfall aus nachhaltigen Dämmmaterialien besteht. Formel 4.7 verdeutlicht diesen Zusammenhang.

$$Q_{Verlust} = U * A * (T_S - T_U) \quad (4.7)$$

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

Der Exergiegehalt des TES ist abhängig von seiner Wärmemenge Q sowie der Temperaturdifferenz zwischen der Speichertemperatur T_S und der Umgebungstemperatur T_U (vgl. hierzu Formel 4.8). Unter Exergie wird der Teil der Energie verstanden, der uneingeschränkt in eine andere Energieform umgewandelt werden kann. Anergie hingegen beschreibt die Energie, die bedingt durch Verluste an die Umgebung etc. nicht weiter nutzbar gemacht werden kann. [30]

$$E_{Exergie} = Q * \frac{T_S - T_U}{T_S} = Q * (1 - \frac{T_U}{T_S}) \quad (4.8)$$

Es besteht die Möglichkeit, über den Tank auch den Trinkwarmwasserbedarf zu decken. Zur Vermeidung von Legionellen muss dreimal täglich eine Temperatur von mind. 70 °C im Tank erreicht werden. Dies geschieht durch einen im Pufferspeicher integrierten Heizstab, der den Speicher auf die geforderte Temperatur erhitzt. Hierfür wird zusätzliche elektrische Energie benötigt, um diesen Temperaturbereich zu erzeugen. In modernen Heizungsanlagen mit bauteilintegrierten Wärmeübergabesystemen (z.B. Fußbodenheizungen) wird dieser Temperaturbereich allerdings nicht benötigt. Sinnvoller ist es, die Heizungs- und Trinkwarmwasserversorgung voneinander zu trennen und das benötigte Warmwasser mithilfe von elektrischen Durchlauferhitzern an der Entnahmestelle bereitzustellen. Bedingt durch kürzere Leitungslängen sowie keiner Zurückhaltung von Warmwasser können Legionellen vermieden werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird auf die Erzeugung von Trinkwarmwasser nicht weiter eingegangen.

In heutigen solarthermischen Anlagen dient die Wärmegewinnung aus solarer Einstrahlung in erster Linie der Heizungsunterstützung. Teilweise dient sie darüber hinaus der solaren Trinkwassererwärmung. Diese Systeme sind stets mit einem Pufferspeicher inklusive eines Heizstabs ausgestattet, der bei Unterschreiten einer vorgegebenen Temperatur zugeschaltet wird. Dies garantiert, dass stets die gewünschten Temperaturen im Tank abrufbar sind. Teilweise werden die Pufferspeicher an einen Nachheizkreis angeschlossen, der meist auf Basis fossiler Energieträger (z.B. Gas) betrieben wird.

Das Ziel ist es, den Gebäudesektor unabhängig von fossilen Energieträgern betreiben zu können. Hierzu werden Technologien benötigt, die sowohl einen autarken als auch einen vernetzten Betrieb gewährleisten können. Je nach städtebaulichen Voraussetzungen sind auch Quartierslösungen möglich, in denen Synergieeffekte genutzt und die Effizienz gesteigert werden können (z.B. Anergienetze). Nachfolgend werden ausschließlich Technologien eingeführt, die zu einem energieeffizienten und klimaneutralen Gebäudebestand beitragen können. Möglichkeiten zu einem Netzbetrieb werden an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Jegliche Arten der fossilen Energieumwandlung werden ausgeschlossen.

Es gibt eine Vielzahl von unterschiedlichen Kollektorarten. Im Wesentlichen unterscheidet man drei Kollektorprinzipien: Solarabsorber, Flachkollektor und Vakuumröhrenkollektor. Darüber hinaus existieren Hybridkollektoren, wie Vakuumflachkollektoren oder PVT-Kollektoren, die neben thermischer Energie auch elektrische Energie erzeugen können. Unterschiede der einzelnen Kollektoren liegen im Wesentlichen in der variierenden Verteilung von Absorption, Emission, Reflexion und Transmission.

Solarabsorber – sind in der Regel unverglaste Absorber und werden häufig zur Erwärmung von Schwimmbadwasser genutzt. Der Aufbau dieser Kollektoren ist einfach und die Herstellung unkompliziert. Das Trägermedium wird durch ein dunkles PVC-Rohr (den Absorber) geführt und nimmt Wärme auf. Durch fehlende Wärmedämmung und Glaselemente sind diese Kollektoren stark witterungsabhängig. Zugleich bieten die fehlenden wärmedämmenden Eigenschaften aber die Möglichkeit, mithilfe eines Absorbers Wärme an die Umgebung abzugeben und eignen sich somit auch zur Kühlung des Trägermediums.

Flachkollektoren – bestehen in erster Linie aus einem Metallabsorber (Kupfer oder Aluminium), der zu allen Seiten mit wärmedämmenden Materialien verbaut ist. Lediglich die der Sonne zugewandte Seite ist mit einer transparenten Abdeckung ausgeführt. Hierdurch lassen sich durch die auftreffende Strahlung im Zwischenraum Temperaturen oberhalb der Außentemperatur erzielen, was zu einem höheren Wirkungsgrad der Anlage führt. Auch dieser Kollektor ist theoretisch in der Lage, Wärme über Emission abzugeben. Jedoch wirkt sich die transparente Abdeckung negativ auf die Wärmeabgabe aus. Unverglaste Flachkollektoren (bestehend aus Kupferblech beschichtet mit schwarzem Lack) erreichen Transmissionswerte von $\alpha = 0,95$ und Emissionswerte von $\epsilon = 0,85$.

Vakuurröhrenkollektoren – sind mit Flachkollektoren vergleichbar und ähnlich aufgebaut. Auch sie haben metallene Absorber, die zur Sonne ausgerichtet werden. Diese Absorber sind einzeln in Röhren verbaut, in denen ein Unterdruck herrscht (Vakuum). Dadurch reduzieren sich die konvektiven Verluste und die Verluste durch Wärmeleitung des Kollektors. Lediglich Strahlungsverluste können nicht vermieden werden. Durch unterschiedliche Beschichtungen kann der Emissionswert niedrig gehalten werden. Vakuurröhrenkollektoren eignen sich am schlechtesten zur Wärmeabgabe. Um den Wirkungsgrad von Vakuurröhrenkollektoren noch weiter anzuheben, können stark reflektierende Schichten unterhalb der Röhren eingesetzt werden, die aufgrund ihrer Geometrie die reflektierte Strahlung in einem Punkt bündeln und somit sehr hohe Temperaturen erreichen können (z. B. Parabolrinnen).

Bei einem Vergleich der Wirkungsgrade der unterschiedlichen Kollektoren wird deutlich, dass Vakuurröhrenkollektoren bis zur Prozesswärmeerzeugung geeignet sind. Ein einfacher Absorber hingegen ist lediglich zur Erwärmung von Schwimmbadwasser ratsam. Zur Raumheizung sind Vakuurröhrenkollektoren sowie Flachkollektoren in hohem Maße geeignet (vgl. Abbildung 4.7).

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

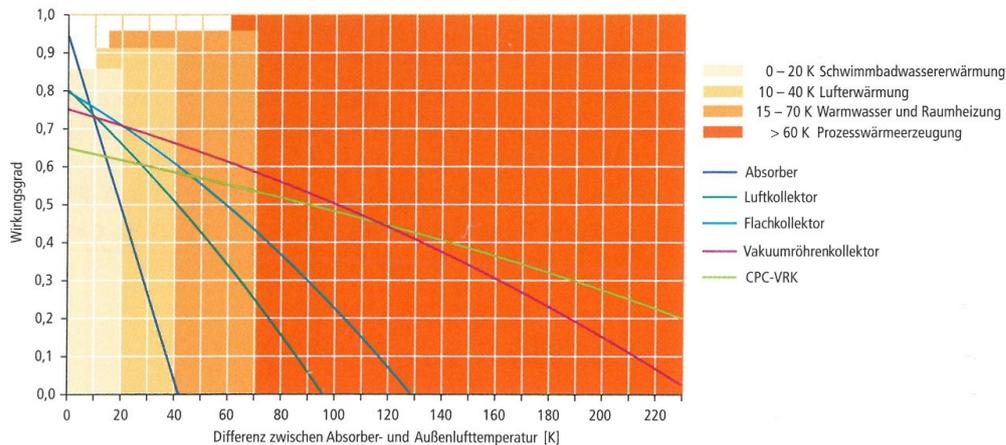


Abbildung 4.7: Wirkungsgradvergleich solarthermischer Kollektoren [28]

PVT-Kollektoren – kombinieren solarthermische Kollektoren mit photovoltaischen Kollektoren. So werden Synergieeffekte beider Kollektorarten optimal genutzt. Photovoltaikkollektoren sind nicht in der Lage, die gesamte auftreffende Strahlung in elektrische Energie umzuwandeln, da ein Teil der Energie in thermische Energie umgewandelt wird (Prinzip der Energieerhaltung, vgl. Formel 4.2). Sie schaffen es lediglich bis zu 18 % der auftreffenden Strahlung in elektrische Energie umzuwandeln. Ein Großteil der Energie wird mit einem Wirkungsgrad von bis zu 46 % in thermische Energie umgewandelt. Diese wird durch thermische Installationen vom Kollektor abgeführt. Die dadurch erzielte niedrigere Temperatur am Kollektor wirkt sich positiv auf den Wirkungsgrad der elektrischen Energiegewinnung aus. Diese Art von solarem Kollektor bietet Potential zum unabhängigen Betrieb der nötigen Pumpen in einem solarthermischen System.

Stehen nur kleine Dachflächen zur Installation von Kollektoren zur Verfügung, eignen sich PVT-Kollektoren zur elektrischen und thermischen Energiegewinnung. Sind größere Flächen vorhanden, sollte darauf geachtet werden, dass die elektrische Energiegewinnung von der thermischen Energiegewinnung getrennt wird. Separat betrachtet können die einzelnen Kollektorarten so ihre Vorteile besser zum Tragen bringen.

4.4.3 Solar Cooling

Bedingt durch höhere interne Lasten sowie größere Glasflächenanteile in der Gebäudehülle und dem daraus steigenden solaren Energieeintrag, steigt die Kühllast von Gebäuden an. Dies erfordert in der Kühlperiode einen größeren anlagentechnischen Aufwand, um diese Lasten abführen zu können. Durch den Einsatz regenerativ gewonnener elektrischer Energie können Kühlaggregate sowie Klimageräte bereits wirtschaftlicher betrieben werden. Um jedoch einen nachhaltigeren Ansatz zu verfolgen (Deckung des Energiebedarfs aus regenerativen Energien) sind passive Maßnahmen zu bevorzugen.

Ein Prinzip dies zu realisieren ist die passive Kälteerzeugung (Radiative Cooling) durch Strahlungskälte. Bedingt durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz und der Stefan-Boltzmann-Kon-

4.4 Effiziente Energiegewinnung am Gebäude und Einsatz alternativer Energieträger

stanten σ tauschen zwei Flächen unterschiedlicher Temperatur konstant langwellige Strahlung aus, solange die Temperatur über dem absoluten Nullpunkt liegt (-273 K). Dabei gibt die wärmere Fläche stets Energie (Wärme) an die kältere Fläche ab. Nach diesem Gesetz nimmt die Strahlungsleistung P eines Körpers der Fläche A um die vierfache Potenz seiner Temperatur T zu (vgl. Gleichung 4.9). [47]

$$P = \sigma * A * T^4 \quad (4.9)$$

Zur Gebäudekühlung wird ein Solarabsorber eingesetzt, der den Nachthimmel als Austauschfläche nutzt. Dieser hat stets eine niedrigere Temperatur als das Objekt und seine Umgebungstemperatur auf der Erdoberfläche. Die Troposphäre stellt eine potentielle Wärmesenke zur Erdoberfläche dar [48] [49]. Somit emittiert ein Objekt auf Erdoberfläche stets langwellige Wärmestrahlung an den Nachthimmel. Das Objekt mit der höheren Temperatur erhält eine geringere Strahlungsleistung zurück und wird dadurch abgekühlt. Bedingt durch die Absorption des Strahlungsspektrums an der Erdatmosphäre wird ein thermischer Austausch zwischen Kollektor und Nachthimmel teilweise verhindert. Es existiert jedoch im infraroten Wellenlängenbereich von 8 - 13 μm ein sog. „atmosphärisches Fenster“, in welchem die Atmosphäre nahezu transparent ist (Voraussetzung ist eine trockene Luft [50]). Innerhalb dieses Bereichs kann Wärme an den Nachthimmel abgestrahlt werden.

Die Himmelstemperatur T_{sky} lässt sich in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur T_{∞} , der Taupunkttemperatur t_{Tp} sowie der Zeit t (Zeit in Stunden nach Mitternacht) nach folgender Gleichung ermitteln:

$$T_{sky} = T_{\infty} * [0,711 + 0,0056 * t_{Tp} + 0,000073 * t_{Tp}^2 + 0,013 * \cos(15 * t)]^{0,25} \quad (4.10)$$

Durch den Strahlungsaustausch zwischen Objekten auf der Erdoberfläche und dem Nachthimmel können Temperaturen unterhalb der oberflächennahen Außentemperatur erreicht werden. So können z.B. Autoscheiben in Nächten gefrieren, obwohl die Außentemperatur über dem Gefrierpunkt liegt. Hierbei tauscht die Windschutzscheibe langwellige Strahlung mit dem kalten Nachthimmel aus. Ausschlaggebend hierfür ist ein Wellenlängenbereich zwischen 7 μm und 14 μm , in dem die Wärmestrahlung am besten abgegeben werden kann. Mit entsprechender Wahl geeigneter Materialien ist es sogar möglich, auch tagsüber mehr Wärme an die Atmosphäre abzustrahlen, als aufgenommen werden kann. [51] [52] [53] [54]

In warmen Sommernächten können so Temperaturen deutlich unter 20 °C erreicht werden. Zur Kühlung eines Gebäudes ist es bereits ausreichend, wenn Temperaturen im Speichertank zwischen 15–20 °C erreicht werden. Die Abhängigkeit der geographischen Lage ist groß, da die Umgebungstemperatur sowie der Bedeckungsgrad der Atmosphäre einen wesentlichen Einfluss auf den Wirkungsgrad der Kühlung haben.

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

Eine Untersuchung aus Israel konnte zeigen, dass es mithilfe von Flachkollektoren möglich ist, langwellige Strahlung abzugeben und so ein Trägermedium abzukühlen. Hier werden Temperaturen unter 20 °C erreicht [55]. Darüber hinaus konnte sie zeigen, dass Flachkollektoren zur Gebäudekühlung nicht so effizient betrieben werden können wie Solarabsorber. Da es sich bei dieser Untersuchung um ein heiß-trockenes Klima handelt, ist davon auszugehen, dass in einem kühlgemäßigen Klima, wie es in Deutschland vorherrscht, deutlich niedrigere Temperaturen erreicht werden können.

Eine weitere Untersuchung von Granqvist und Hjortsberg aus dem Jahr 1981 zeigt, wie mithilfe des klaren Nachthimmels Temperaturen weit unter der Umgebungstemperatur erzielt werden können. Hierzu dient eine Aluminiumplatte, die mit Siliciummonooxid beschichtet wurde. Das physikalische Wirkungsprinzip ist in dieser Betrachtung gleich. Langwellige Strahlung (Wärmestrahlung) wird an den Nachthimmel abgegeben, der als Wärmesenke dient. In dieser Betrachtung werden hauptsächlich Materialien getestet und miteinander verglichen. Es werden Materialien mit Emissionsgraden von 0,9 angesetzt. Darüber hinaus halten Granqvist und Hjortsberg fest, dass das Kühlprinzip am effizientesten in klaren Nächten beobachtet werden konnte. Es konnte aber auch eine Kühlung des Mediums an einem klaren Tag beobachtet werden, an dem die solare Einstrahlung nicht zu intensiv war. [50]

Eine Untersuchung aus China hat mithilfe eines bei Nacht betriebenen Flachkollektors (2 m², 32° Dachneigung), eines sensiblen thermischen Speichers und einer Zirkulationspumpe nachgewiesen, dass bei Außentemperaturen zwischen 23,2 °C und 29,5 °C der Betrieb einer Fußbodenkühlung zur Reduzierung der operativen Raumtemperatur führt. Die Oberflächentemperatur des Fußbodens sollte hierbei 19 °C nicht unterschreiten. Es konnte gezeigt werden, dass ohne zusätzliche Kühlaggregate die Temperatur im Speichertank, die Oberflächentemperatur des Fußbodens sowie die Innenraumtemperatur deutlich gesenkt werden konnten (die Innenraumtemperatur konnte von 28 °C auf 21 °C reduziert werden) . [56]

Radiative Cooling hat – bedingt durch ein einfaches technisches Verfahren und leichte Umsetzung – durchaus Potential, die anfallenden Kühllasten in Gebäuden zu decken. Das Trägermedium Wasser, gekoppelt mit einem thermischen Speicher bietet die Möglichkeit der Übertragung der Kälte in Zeiten größeren Kälteenergiebedarfs. Auch hier spielt die geeignete Wahl der Materialien eine entscheidende Rolle für die Effizienz der kompletten Anlage. [47] [57]

Thermische Energiespeicher erlauben es, die gewonnene Kälte zwischenspeichern, bis höhere Wärmelasten auftreten. Bedingt durch das Umgebungstemperaturniveau und den entsprechenden Vorlauftemperaturen zur Raumkühlung eignen sich sensible thermische Speicher am besten. Auch durch die geringen Umweltwirkungen kann diese Art der Kältespeicherung überzeugen.

Eine Untersuchung, die von der Hochschule für Technik in Stuttgart durchgeführt wurde, hat PVT-Kollektoren zur nächtlichen Abkühlung via Radiative Cooling an unterschiedlichen Standorten untersucht. Im Rahmen des europäischen Solar Decathlon Wettbewerbs wurde das Kühlpotential für hybride Kollektoren untersucht. Die Kollektoren wurden horizontal auf dem

Gebäude platziert, um die Abstrahlung gegen den Himmel bei Nacht zu maximieren. Unter den kontinentalklimatischen Bedingungen von Madrid konnte so eine durchschnittliche Kühlleistung von 41 W/m^2 erzielt werden. Die durchschnittliche Temperatur des sensiblen Wärmespeichers betrug $20,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Dies erscheint auf den ersten Blick nicht ausreichend, allerdings wurde das Wasser mit dieser Temperatur direkt in die Decken- und Fußbodenkühlung geführt und konnte den betrachteten Raum behaglich konditionieren. Vergleichende Untersuchungen wurden am Standort Stuttgart durchgeführt. Hier konnten Kühlleistungen von $60 - 65 \text{ W/m}^2$ erzielt werden. [58]

4.5 Werkzeuge zur energetischen Gebäude- und Anlagensimulation und Optimierung

Klassische Planung – In der klassischen Planung von gebäudetechnischen Anlagen wird stets von Extremsituationen ausgegangen, die mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit eintreten, um stets die geforderte operative Raumtemperatur gewährleisten zu können. Die Berechnung und Auslegung der einzelnen Komponenten basiert auf statischen Berechnungsmethoden, die ihre Funktionsfähigkeit innerhalb dieser Extremsituationen garantieren. So wird beispielhaft die Heizlast eines Gebäudes (bestehend aus Norm-Transmissions- und Lüftungswärmeverlusten, vgl. Formel 4.11) in Abhängigkeit der niedrigsten Außentemperatur des Testreferenzjahres am Standort ermittelt.

$$\Phi_i = \Phi_T + \Phi_V \quad (4.11)$$

Um die Norm-Transmissions- und Lüftungswärmeverluste bestimmen zu können, werden die bauphysikalischen Eigenschaften der wärmeübertragenden Gebäudehülle benötigt. Die Anforderungen an die Bauteile können den aktuellen bautechnischen Standards und Richtlinien entnommen werden. Am Standort München entspricht die minimale Norm-Außentemperatur $\theta_e = -16 \text{ }^\circ\text{C}$ und tritt statistisch innerhalb des Testreferenzjahres lediglich einmal auf. Die Dichtigkeit der Gebäudehülle sowie die strengen Anforderungen an Wärmedurchgangskoeffizienten verleihen dem Gebäude Trägheit, sodass die Wahrscheinlichkeit, dass extreme Außentemperaturen im Innenraum zeitnah wahrgenommen werden, gering ist. Nachfolgende Formeln 4.12 und 4.13 verdeutlichen diesen Zusammenhang anhand der Norm-Transmissionswärmeverluste Φ_T .

$$\Phi_T = (H_{T,ie} + H_{T,iue} + H_{T,ig} + H_{T,ij}) * (\theta_{int} - \theta_e) \quad (4.12)$$

$$H_{T,ie} = \sum_k (A_k * U_k * e_k) + \sum_k (\psi_k * l_l * e_l) \quad (4.13)$$

4 Grundlagen energieeffizienter Gebäude

Aufbauend auf den ermittelten Werten wird die gebäudetechnische Anlage so dimensioniert, dass bei einer Außentemperatur von $\theta_e = -16 \text{ °C}$ eine operative Raumtemperatur von $\theta_{\text{int}} = 20 \text{ °C}$ stets garantiert werden kann. Analog hierzu wird die Kühllast ebenfalls in Abhängigkeit von extremen Außentemperaturen bestimmt.

Gebäude- und Anlagensimulation – Mithilfe von computerbasierten thermisch-energetischen Simulationsmodellen lassen sich Gebäude- und Anlagenmodelle dynamisch darstellen und ein effizienterer Einsatz von gebäudetechnischen Anlagen wird ermöglicht. Der Energiebedarf und -verbrauch von komplexen Gebäuden kann kostengünstig und anschaulich innerhalb eines dynamischen Umfelds analysiert werden.

Ziel der Gebäude- und Anlagensimulation ist eine realitätsnahe Abbildung des erwarteten Energiebedarfs und Energieverbrauchs von Gebäuden sowie das frühzeitige Aufdecken von energetischen Einsparpotentialen. Hierzu werden computerbasierte Simulationswerkzeuge eingesetzt, die mathematische und physikalische Zusammenhänge numerisch lösen. Ein computerbasiertes Modell ist somit eine Darstellung eines physikalischen Systems. Das Modell kann als Funktion angesehen werden, bestehend aus Inputs, die einen eindeutigen Output generieren [59]. So kann der ideale Betriebszustand eines Gebäudes in Abhängigkeit des Klimas ermittelt werden und eine frühe Optimierung der einzelnen Komponenten erfolgen. Je detaillierter die Kenntnisse über das Gebäude und die Anlagentechnik, desto wahrscheinlicher kann ein energieeffizienter Betrieb gewährleistet werden. Häufig werden einzelne Zonen genauer betrachtet, um daraus Erkenntnisse für die gesamte Liegenschaft zu gewinnen.

Damit kann die Auslegung und Dimensionierung von gebäudetechnischen Anlagen effizient gestaltet werden. Einzelne Komponenten lassen sich leicht austauschen und miteinander vergleichen. Die vom Planer getroffenen Eingaben entsprechen den Vorgaben aus Richtlinien und Verordnungen. Für die Planung von energieeffizienten und nachhaltigen Gebäuden ist der Einsatz von Simulationswerkzeugen zwingend erforderlich. Damit lassen sich Wechselwirkungen zwischen einzelnen Gewerken und Betriebszuständen analysieren sowie unterschiedliche Technikkonzepte miteinander vergleichen. Eine Simulation startet bei der Modellierung des Gebäudes und Anlagentechnik und setzt sich über die Durchführung der Simulation bis hin zur Ergebnisdarstellung fort. Abschließend muss eine Analyse der Resultate durchgeführt werden, im Falle nicht zufrieden stellender Ergebnisse werden die Eingangswerte der Simulation angepasst und der Prozess startet von vorne. Abbildung 4.8 verdeutlicht dieses Vorgehen.

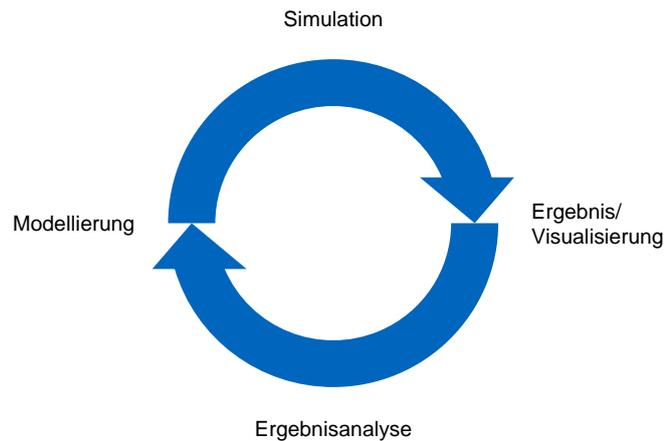


Abbildung 4.8: Kreislauf von thermisch-energetischen Simulationsprozessen nach [60]

In der vorliegenden Untersuchung wurde Transient Systems Simulations (TRNSYS) (Version 17.02.0004) als Tool zur thermisch-energetischen Anlagensimulation (TRNBuild und Type 56 zur Gebäudesimulation) gewählt. Der modulare Aufbau sowie eine flexible Simulationsumgebung bieten die Möglichkeit der Platzierung von Variablen zur energetischen Anlagenoptimierung (Thermal Energy System Specialists, LLC, 2017).

Mithilfe von TRNSYS lassen sich solare Energiesysteme numerisch abbilden. Diese Systeme bestehen aus Komponenten zur Aufnahme der Globalstrahlung sowie zur Speicherung und Abgabe der gewonnenen Energie für bestimmte Aufgaben (z.B. der Beheizung eines Gebäudes). Die Leistung des Energiesystems ist abhängig von den vorherrschenden klimatischen Bedingungen am Standort. In einem Heiz- und Kühlkonzept für ein Gebäude sind der Energiebedarf sowie die gewonnene Energie Funktionen in Abhängigkeit der solaren Einstrahlung, der Umgebungstemperatur und weiteren meteorologischen Variablen. [61]

Abbildung 4.9 visualisiert die wesentlichen In- und Outputs einer TRNSYS Simulation. Je detaillierter die Informationen über das abzubildende Gebäude vorliegen, desto genauer können die Resultate ermittelt werden. Die wesentlichen Kenngrößen für die Inputs der thermisch-energetischen Gebäudesimulation sind Kenntnisse über die klimatischen Bedingungen (diese werden über Wetterdateien direkt in die Software eingebunden), detaillierte Informationen über die Gebäudebeschaffenheit sowie deren Anlagen- und Gebäudetechnik. Darüber hinaus werden interne Lasten mit in die Bilanzierung aufgenommen. Betriebsstrategie und Betriebszeiten stellen unter anderem den Betrachtungsraum innerhalb der Simulation dar. Als Ergebnis kann eine dynamische Ermittlung der thermischen Lasten sowie ein Jahresverlauf der Heiz- und Kühllast erwartet werden. Es besteht zudem die Möglichkeit, die Einhaltung von Behaglichkeitskriterien im Innenraum zu kontrollieren.

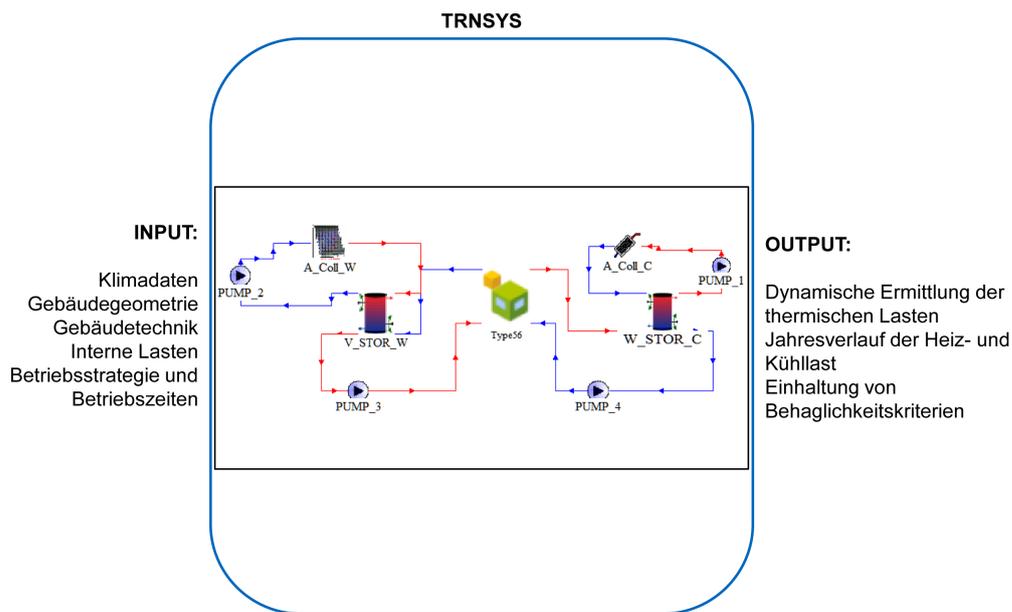


Abbildung 4.9: In- und Outputs von TRNSYS

Optimierung – Um mehreren Anforderungen gleichzeitig gerecht werden zu können, bieten sich Optimierungswerkzeuge innerhalb der thermisch-energetischen Simulation an. Dabei ist es möglich, mithilfe von mathematischen und stochastischen Optimierungsverfahren das ideale Zusammenwirken unterschiedlicher Zielgrößen zu ermitteln und die optimale Betriebsweise zu identifizieren. Einsparpotentiale können somit frühzeitig aufgedeckt und die Potentiale zur Nutzung regenerativer Energien rechtzeitig definiert werden. Hierzu muss im Rahmen der Modellierung eine Zielgröße mithilfe einer Zielfunktion definiert werden. Anhand dieser lässt sich der Einfluss variierender Eingangsparameter (Input) auf das Ergebnis der Zielfunktion (Output) ermitteln.

Mithilfe des Generic Optimization Program (GenOpt) können die Parameter, die über TRNSYS in einer Textdatei abgelegt werden, direkt angesteuert und verändert werden. Es handelt sich hierbei um eine Parameteroptimierung für Simulationsprogramme (TRNSYS, IDA ICE, EnergyPlus, etc.). Dadurch wird eine automatisierte Optimierung gestartet und ein globales Optimum innerhalb eines definierten Bereichs gesucht. Bedingung für diese Optimierung ist eine Zielfunktion (cost function optimization), die ein eindeutiges Ergebnis definiert [62]. Die Variation der einzelnen Parameter wird solange fortgeführt, bis keine Änderung, bzw. Besserung der Ergebnisse erzielt werden kann.

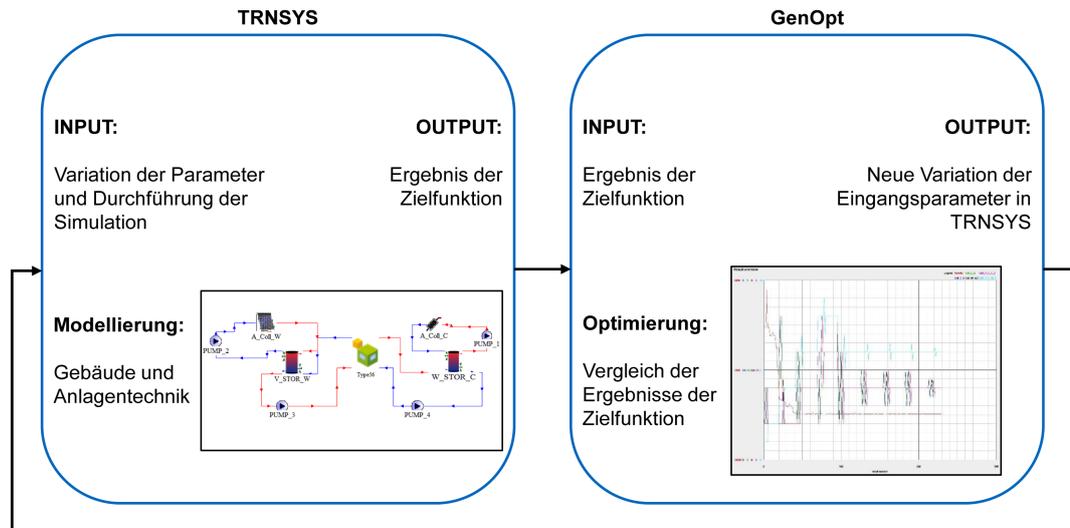


Abbildung 4.10: Ablauf der Optimierung in TRNSYS und GenOpt in Anlehnung an [63]

Es existieren unterschiedliche Optimierungsalgorithmen zur Identifizierung der Extremwerte innerhalb des definierten Bereichs. Die geeignete Wahl eines passenden Algorithmus wird in wissenschaftlichen Untersuchungen diskutiert. Neben den bereits erwähnten Simulations- und Optimierungswerkzeugen gibt es noch weitere Tools, unter deren Einsatz Optimierungen durchgeführt werden können [64]. Nachfolgendes Kapitel gibt einen Überblick über die Grundlagen der energetischen Optimierung von Gebäuden und Anlagentechnik.

4.6 Kurzzusammenfassung

Die Energieeinsparungen auf der Bedarfsseite eines Gebäudes (dichter werdende Gebäudehülle) verschiebt den Fokus der Gesamtenergieeffizienz auf die Anlagen- und Regelungstechnik. Solare Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen können gebäudetechnische Anlagenkonzepte sinnvoll ergänzen und zu einem behaglichen Innenraumklima beitragen. Hierbei bieten sensible thermische Energiespeicher eine nachhaltige und kostengünstige Möglichkeit, Wärme sowie Kälte in energieärmere Zeiten zu übertragen. Die Gebäude- und Anlagensimulation sowie die Optimierung von Anlagenkonzepten wird zukünftig hierbei eine wesentliche Rolle einnehmen.

5 Grundlagen der Optimierung

Um die energetisch-thermische Anlagen- und Gebäudesimulation zu verbessern, werden Optimierungswerkzeuge herangezogen, die die optimale Auslegung der Anlagentechnik ermitteln. Dabei ist die wesentliche Aufgabe des Optimierungsverfahrens, die Parameter des Modells so zu variieren, bis ein Optimum gefunden ist. Dabei besteht ein Optimierungsproblem im einfachsten Fall aus einer realen Funktion, die es zu maximieren (Fitness Function Optimization) oder zu minimieren (Cost Function Optimization) gilt. Durch systematische Eingabewerte innerhalb eines definierten Intervalls wird der Wert der Funktion ermittelt und das Optimum identifiziert. In dieser Untersuchung wird lediglich die Cost Function Optimization (CFO) betrachtet.

Es bestehen unterschiedliche Ansätze und Algorithmen, um die Extremwerte (Optima) einer Zielfunktion aufzudecken. Weit verbreitete Methoden bestehen in deterministischen oder stochastischen Optimierungsverfahren. Aufbauend auf dem mathematischen Sachverhalt von Optimierungsvorgängen beschäftigen sich nachfolgende Kapitel mit den unterschiedlichen Optimierungsverfahren und zeigen Stärken und Schwächen einzelner Vertreter beider Kategorien auf.

5.1 Mathematischer Sachverhalt

Das Auffinden passender Input-Werte einer Funktion zur Minimierung bzw. Maximierung ihrer Lösung stellt die mathematische Grundlage der Optimierung dar [65]. Numerische, computerbasierte Optimierungen nutzen Algorithmen, um eine große Anzahl an Simulationsschritten und Optimierungsproblemen kosteneffizient und zeitsparend zu lösen [66]. Dabei werden die Outputs der Zielfunktionen bei variierenden Inputparametern miteinander verglichen und so oft wiederholt, bis ein Optimum gefunden wird.

Mathematisch wird ein Optimierungsproblem wie folgt definiert:

$$\min f(x), x \in \mathbb{R}^N \quad (5.1)$$

Hierbei wird nach einem Minimum innerhalb eines definierten Ergebnisraums gesucht. Wird das vordefinierte Minimum nicht erreicht (erwartetes Ergebnis der Zielfunktion), wird je nach Optimierungsalgorithmus weiter innerhalb dieses Ergebnisraums nach dem Optimum gesucht.

5 Grundlagen der Optimierung

Es werden einzelne Parameter variiert, die je nach Algorithmus durch feste Regeln geändert werden. Über dieses Verfahren werden mit jeder neuen Simulation Annäherungen an das globale Optimum erzielt [67]. Bei Erreichen des Optimums der Zielfunktion wird die Optimierungssimulation abgebrochen. Das mathematische Problem aus Formel 5.1 gilt es innerhalb einer Optimierung zu lösen.

Anhand eines vereinfachten Beispiels wird dieser Vorgang nachfolgend dargestellt. Grundlage der Optimierung ist das Aufdecken eines globalen Optimums (Minimum oder Maximum) einer vorgegebenen Zielfunktion. Abbildung 5.1 zeigt das globale Optimum einer einfachen mathematischen Funktion (vgl. Formel 5.2).

$$f(x) = (x - 2)^2 + 2 \quad (5.2)$$

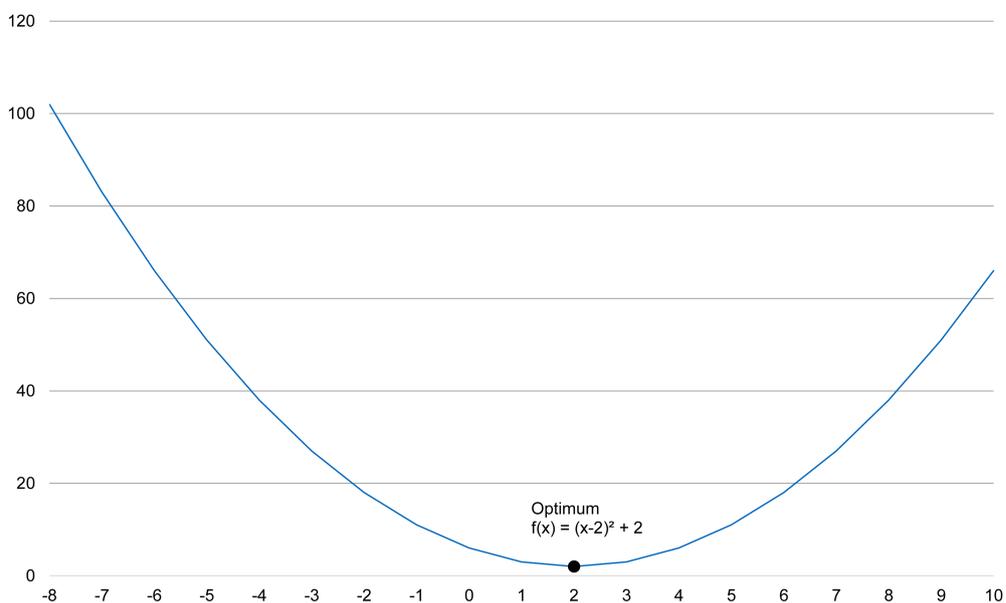


Abbildung 5.1: Darstellung des Optimums einer einfachen mathematischen Funktion

Das Optimierungsproblem (das Auffinden der Extremwerte) kann in diesem Fall durch Ableitungen und Nullstellen der Funktion eindeutig ermittelt werden. Die Forderung der Optimierung wird in Formel 5.3 festgehalten.

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \min(x - 2)^2 + 2 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Ableiten und Nullsetzen der Funktion 5.3 ergibt die Formeln 5.4. Daraus lässt sich das Optimum der Funktion bei $x = 2$ ermitteln.

$$\begin{aligned}
 f'(x) &= 2(x - 2) \\
 f'(x) &= 0 \\
 0 &= 2(x - 2) \\
 \Rightarrow x &= 2
 \end{aligned}
 \tag{5.4}$$

Sobald die Funktionen komplexer werden, steigt die Schwierigkeit beim Aufdecken der Extremwerte. Abbildung 5.2 zeigt den Verlauf einer komplexen mathematischen Funktion. Neben einem globalen Optimum sind mehrere lokale Optima erkennbar.

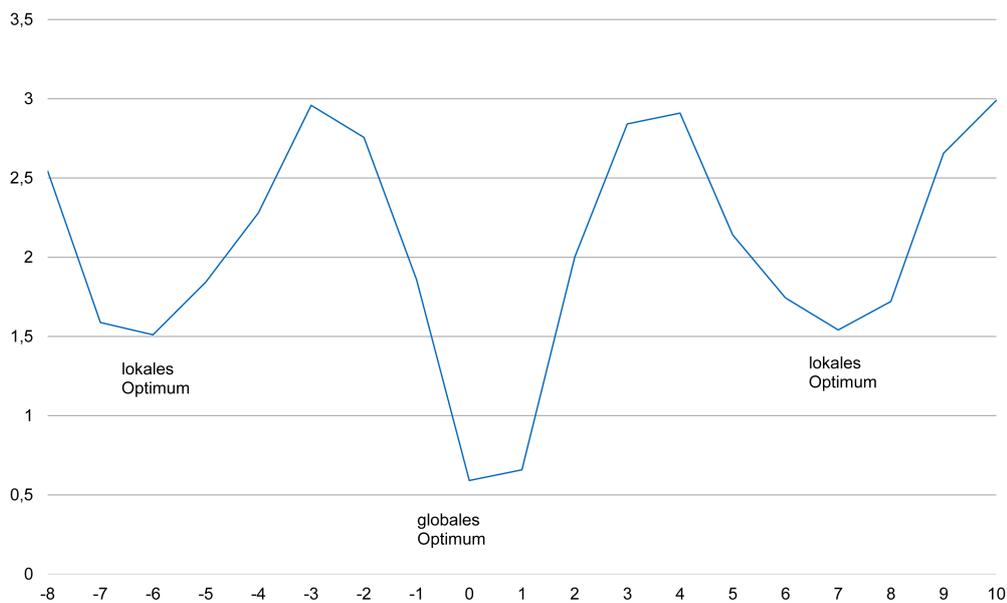


Abbildung 5.2: Darstellung der Optima (lokal und global) einer komplexen mathematischen Funktion

Da bei steigender Komplexität der Funktionen der Verlauf der Funktion nicht mehr bekannt ist, werden numerische Optimierungsalgorithmen zur Identifikation der lokalen und globalen Optima herangezogen. Hierbei stellt sich, bedingt durch die große Anzahl an Optimierungsalgorithmen, die Frage nach einem geeigneten Algorithmus, der im Rahmen einer thermisch-energetischer Gebäudesimulation herangezogen werden kann.

Um ein Optimum erreichen zu können, muss eine Zielfunktion definiert sowie der Wertebereich der Fehlerfläche aufgespannt werden. Auf dieser Fläche gilt es ein Optimum zu identifizieren. Mithilfe der sog. CFO werden die Ergebnisse ausgewertet, bei variierenden Eingangsparametern miteinander verglichen und solange wiederholt, bis ein Optimum erreicht ist.

Grundsätzlich lassen sich Optimierungsalgorithmen in deterministische und stochastische Optimierungsverfahren unterteilen. Nachfolgend werden beide Verfahren vorgestellt und typische anwendungsorientierte Verfahren genauer betrachtet.

5.2 Deterministische Optimierungsverfahren

Deterministische Optimierungsverfahren zur Lösung nicht-linearer Optimierungsprobleme werden in drei Kategorien unterteilt: 0. Ordnung, 1. Ordnung und 2. Ordnung. Mit steigender Ordnung steigt die Komplexität zur Anwendung dieser Algorithmen. Diese Verfahren starten ihre Minimumssuche – gegenüber stochastischen Optimierungsverfahren – lediglich an einem vorgegebenen Flächenpunkt. Dadurch ist eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse stets möglich. So wird bei mehreren Untersuchungen mit gleichem Ausgangswert immer das identische Ergebnis mit dem identischen Lösungsweg ermittelt. Dabei besteht allerdings die Möglichkeit, dass sich die Optimierung in einem lokalen Minimum festsetzt und ein falsches globales Optimum ausgibt (vgl. Abbildung 5.6).

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die Einordnung der unterschiedlichen Optimierungsverfahren und zeigt einzelne Beispiele.

Tabelle 5.1: Einteilung deterministischer Optimierungsverfahren nach [68]

deterministische Optimierungsverfahren						
0. Ordnung		1. Ordnung			2. Ordnung	
Simplex-Methode (Nelder-Mead-Verfahren)	Hooke-Jeeves-Tastverfahren	fixe Schrittweite	Momentumterm	variable Schrittweite	Konjugierte Gradienten	Newton

Optimierungsverfahren 1. Ordnung benötigen keine Ableitungsberechnungen, sind leicht verständlich und einfach in Simulationsumgebungen zu implementieren. Auf der anderen Seite benötigen Optimierungen der 1. Ordnung die erste Ableitung. Parallel hierzu benötigen Optimierungsverfahren 2. Ordnung die zweite Ableitung der Zielfunktion. Die Optimierungsverfahren 1. und 2. Ordnung greifen auf die Taylorapproximation (schrittweises Näherungsverfahren nach Taylor) zurück.

Optimierung 0. Ordnung – Vertreter dieser Optimierungen sind die Simplex-Methode sowie der Hooke-Jeeves Algorithmus (HJ) [68]. Beide Varianten werden nachfolgend vorgestellt sowie ihre Stärken und Schwächen diskutiert.

Simplex-Methode

Mithilfe der Simplex-Methode wird innerhalb der Zielfunktion eine willkürliche Fläche anhand fester Punkte aufgespannt. Die Ergebnisse der Eckpunkte der Fläche werden miteinander

verglichen und der schlechteste Punkt (schlechtestes Ergebnis aus der Zielfunktion) dieser Fläche wird durch einen neuen Punkt ersetzt. Der neue Punkt entsteht durch Spiegelung des schlechtesten Punktes an der Hyperebene der verbleibenden Punkte. Abbildung 5.3 verdeutlicht das Vorgehen der Methode.

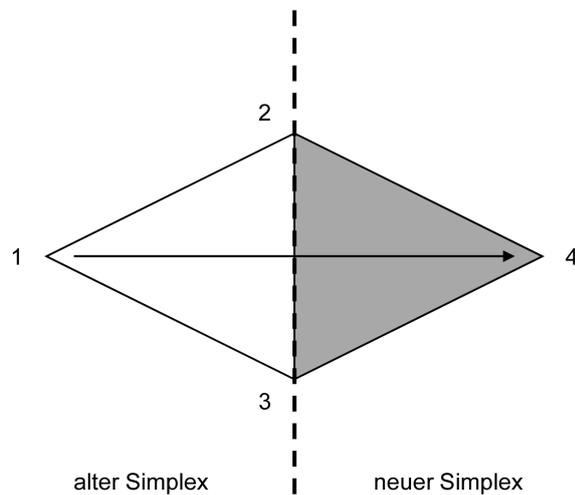


Abbildung 5.3: Funktionsprinzip der Simplex-Methode in Anlehnung an [68] nach [69]

Die Punkte 1 - 3 spannen die bereits erwähnte Fläche auf. Punkt 1 liefert das schlechteste Ergebnis aus Problemstellung. Daraufhin wird Punkt 1 an der Hyperebene gespiegelt und ein neuer Simplex entsteht. Anschließend wird das Vorgehen so lange wiederholt, bis ein Optimum aufgedeckt wird. Abbildung 5.4 zeigt ein Vorgehen der Simplex-Methode zur Annäherung an das Optimum. Ausgangssituation ist hierbei die Fläche 1 - 3. Das Verfahren wird nach Aufspannen der Fläche 10 - 12 abgebrochen, da keine Besserung der Resultate erzielt werden kann.

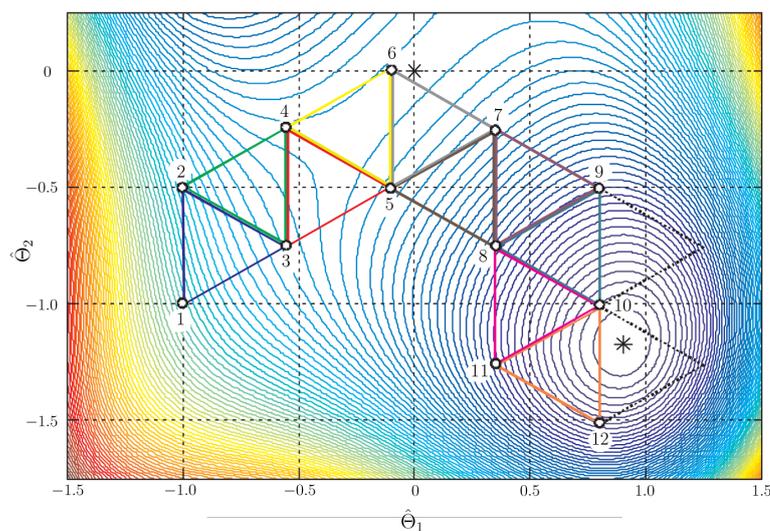


Abbildung 5.4: Beispielhaftes Vorgehen der Simplex-Methode in Anlehnung an [68] nach [69]

5 Grundlagen der Optimierung

Das Simplex-Verfahren ist ein verhältnismäßig altes Optimierungsverfahren, das erstmals 1947 von George Dantzig vorgestellt wurde [70]. Ein Nachteil dieser Methode ist, dass nicht garantiert werden kann, dass das globale Optimum der Problemstellung gefunden wurde. Es besteht die Möglichkeit, dass sich das Simplex-Verfahren in einem lokalen Optimum festsetzt und das falsche Optimum als globales Optimum ermittelt. Demnach gibt der Algorithmus keine exakte Lösung des Problems aus oder interpretiert das Optimierungsproblem als unlösbar [68]. Dennoch wird diese Methode häufig bei Optimierungsproblemen angewandt, obwohl es sich nur um ein lokales Optimierungsverfahren handelt.

Durch Änderung der Größe des Simplex besteht die Möglichkeit, näher an das Optimum zu kommen. Nelder und Mead haben hierzu bereits 1965 eine Methode entwickelt. Mit dieser ist es möglich, sich schneller und genauer an ein Optimum anzunähern. [71]

Hooke-Jeeves-Tastverfahren

Hierbei handelt es sich um ein einfaches nichtlineares Optimierungsverfahren (auch Pattern Search oder Black-Box Search genannt), das einen willkürlichen Anfangspunkt in der Funktionsfläche der zu optimierenden Funktion setzt und sich schrittweise an ein Minimum herantastet. Dabei wird stets nur ein Parameter der N Koordinatenachsen verändert, mit dem Ergebnis der vorangegangenen Simulation verglichen und ausgewertet. Ist keine Besserung der Optimierung erkennbar, wird der Wert zurückgesetzt und mit der gleichen Schrittweite in die negative Richtung ausgeführt (vgl. Abbildung 5.5 die Tastschritte 5 - 7). Ist auch hier keine Besserung erzielt worden, wird eine andere Variable geändert. Ist eine Besserung erkennbar, wird die eine Variable in einer anderen Koordinatenrichtung nach dem gleichen Prinzip wie eingangs beschrieben variiert. Dieser Algorithmus sammelt die Erfahrungen aus den vorangegangenen Simulationen und kontrolliert, ob eine Verbesserung des Ergebnisses der Problemstellung erreicht wurde. Werden keine weiteren Optimierungen erzielt, bricht das Optimierungsverfahren ab und das Optimum wird ausgegeben. [72] [73]

Abbildung 5.5 zeigt ein exemplarisches Höhenbild des HJ-Tastverfahrens. Es ist gut erkennbar, dass in den ersten Optimierungsschritten große Änderungen der einzelnen Variablen vorgenommen werden. Sobald sich der Algorithmus dem Optimum nähert, werden die Tastweiten halbiert, um ein exakteres Ergebnis zu realisieren. Diese Halbierung findet in der Abbildung nach dem siebten Tastschritt statt. Die Halbierung der Tastweiten wird so oft ausgeführt, bis keine Verbesserung der Zielfunktion erzielt werden kann.

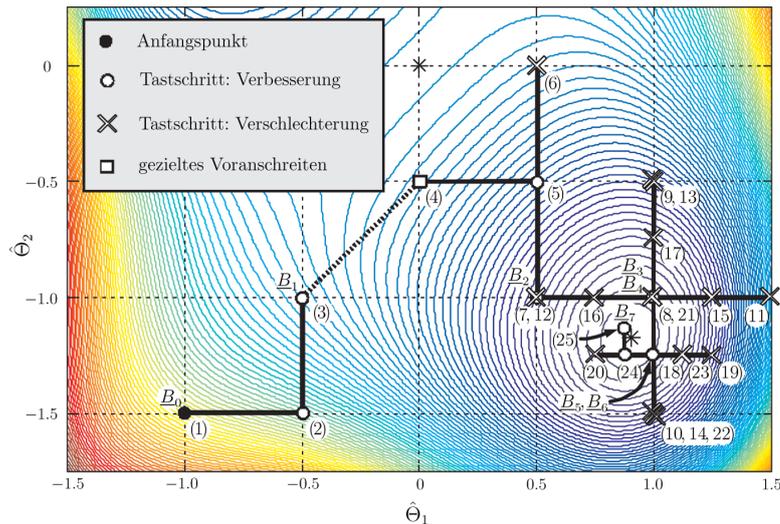


Abbildung 5.5: Beispielhaftes Höhenbild des Hooke Jeeves-Tastverfahrens [68]

Da in diesem Optimierungsalgorithmus ein vordefinierter Startpunkt angegeben werden muss, besteht die Möglichkeit, dass sich die Optimierung innerhalb eines lokalen Optimums festsetzt und das globale Optimum außer Acht gelassen wird. In Abbildung 5.6 wird dieses Verhalten anhand der orangen Linien verdeutlicht. Aus diesem Grund bietet sich dieses Optimierungsvorgehen erst an, wenn bereits Kenntnisse des Modelldesigns vorhanden sind und der Startpunkt der Optimierung in der Nähe des wahrscheinlichen globalen Minimums gesetzt werden kann. Ist dies nicht der Fall, sollten alternative Optimierungsalgorithmen gewählt werden.

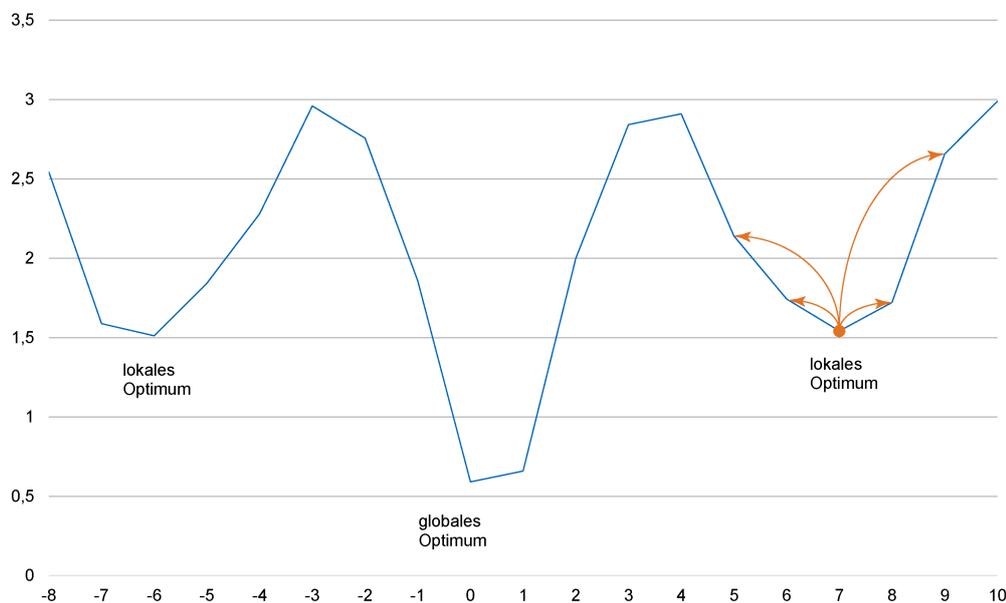


Abbildung 5.6: Festgefahrener Optimierungsalgorithmus in einem lokalen Optimum in Anlehnung an [74] und [75]

Bedingt durch die Einfachheit dieses Verfahrens (gegenüber der Simplex-Methode und Optimierungen der 1. und 2. Ordnung), sind schnelle Potentialabschätzungen durch kurze Si-

mulationszyklen möglich und können einfach in den Planungsprozess von Gebäude- und Analgensimulationen eingebunden werden. Allerdings besteht bei diesem Verfahren die Möglichkeit, dass die Optimierung frühzeitig in einem lokalen Optimum abgebrochen wird und das globale Optimum nicht identifiziert wird [68].

Optimierung 1. und 2. Ordnung – Da diese Verfahren zur Optimierung thermisch-energetischer Gebäudesimulationen nicht zum Einsatz kommen – bedingt durch einen höheren Aufwand bei der Implementierung sowie einem größeren Rechen- und Speicheraufwand – wird an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber darauf eingegangen.

Optimierungen 1. Ordnung benötigen zum Auffinden von Optima die erste Ableitung der Zielfunktion. Mit dem Festlegen von kleinen Lernschrittweiten und eines geeigneten Startpunktes auf der Fehlerfläche wird sich schrittweise dem Optimum angenähert. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis das Optimum der Kostenfunktion erreicht wurde. Diese Verfahren sind im Wesentlichen von der geeigneten Wahl der Lernschrittweite sowie der passenden Wahl des Momentumterms abhängig. Die passende Wahl entscheidet über die Schnelligkeit, in der ein Optimum erreicht wird.

Optimierungen 2. Ordnung bedienen sich der zweiten Ableitung der Kostenfunktion und erhalten somit detailliertere Informationen über die Betrachtungsfläche. Sie können demnach zielgerichteter und schneller die Optima innerhalb der Fehlerfläche identifizieren. [68]

5.3 Stochastische Optimierungsverfahren

Eine weitere Möglichkeit, Optimierungen durchzuführen, bieten stochastische Optimierungsverfahren. Hierbei wird an mehreren Stellen der Fehlerfläche angesetzt, um die Wahrscheinlichkeit des Auffindens eines globalen Optimums zu erhöhen. So werden mindestens zwei Optimierungen parallel durchgeführt und untereinander ausgewertet. Die Startpunkte beider Optimierungen unterscheiden sich, können aber im ungünstigsten Fall ebenfalls nur die Ergebnisse für lokale Minima liefern, ohne dass das globale Minimum aufgedeckt wurde. Grundsätzlich sind die Abläufe stochastischer Optimierungsverfahren nicht reproduzierbar und liefern stets einen unterschiedlichen Optimierungsverlauf. Hiermit ist es möglich, durch stärkere Variation der Eingangsdaten einen größeren Bereich der Fehlerfläche abzudecken. Einen Überblick über stochastische Optimierungsverfahren zeigt Tabelle 5.2. [68]

Tabelle 5.2: Einteilung stochastischer Optimierungsverfahren nach [68]

stochastische Optimierungsverfahren			
simulated Annealing	Evolutionsstrategien	Particle Swarm Optimization (PSO)	neuronale Netze

Simulated Annealing

Das Prinzip des Simulated Annealing orientiert sich am Abkühlverhalten von Festkörpern. Dabei wird das optimale Verhalten von Teilchen innerhalb ihrer Kristallstruktur betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit, dass Teilchen in Abhängigkeit der Temperatur eine schlechtere energetische Position einnehmen können, lässt sich mit der Boltzmann-Verteilung beschreiben. [68]

Dabei besteht innerhalb des Optimierungsverfahrens – aufgrund der zufälligen Suchschritte – ein lokales Optimum wieder verlassen zu können und die Möglichkeit innerhalb eines vermeintlich besseren Optimums weiter suchen zu können. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, ein globales Optimum aufzufinden. Abbildung 5.7 zeigt das Höhenbild des Simulated Annealing Verfahrens. Es ist gut erkennbar, wie innerhalb eines lokalen Optimums nach einer Lösung gesucht wird, dies aber wieder verlassen und ein neues Optimum ermittelt wird.

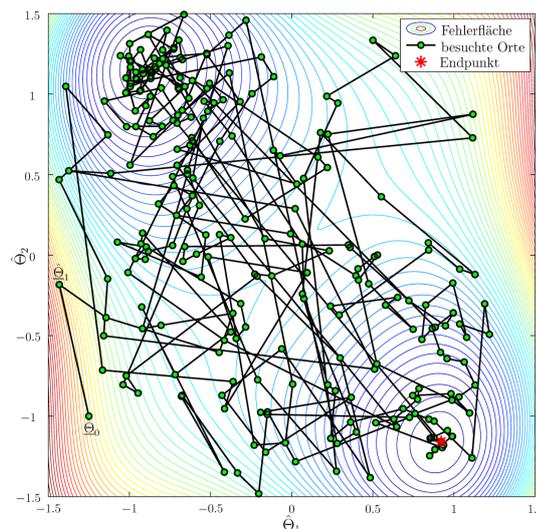


Abbildung 5.7: Beispielhaftes Höhenbild der Simulated Annealing Optimization [68]

Particle Swarm Optimization – PSO

Particle Swarm Verfahren gehören in die Kategorie der populationsbasierten Evolutionsstrategien. Erstmals erwähnt wurden die Particle Swarm Optimization (PSO) im Jahr 1995 von Kennedy und Eberhart. Sie orientieren sich am sozialen Verhalten von Vogelschwärmen oder Schwarmfischen [76]. Populationsbasierte Verfahren sind stochastische Optimierungsverfahren, in denen mehrere Anfangsinitialisierungen herangezogen werden, frei gewählte Parameterzusammenstellungen gewählt und betrachtet werden und miteinander verglichen werden (vgl. Abbildung 5.8). Dabei verfolgt der Algorithmus kein festes Schema. Der Optimierungsverlauf ist demnach nicht reproduzierbar.

Mithilfe der PSO werden mehrere Startpunkte gesetzt, parallel optimiert und untereinander verglichen (Individuum 1 - 5 in Abbildung 5.8). So kann mit einer höheren Wahrscheinlichkeit das globale Minimum identifiziert werden. Gegenüber dem HJ-Tastverfahren wird die Wahrscheinlichkeit des Aufdeckens eines globalen Minimums durch die größere Anzahl und wahllosen Startpunkten der Optimierung erhöht.

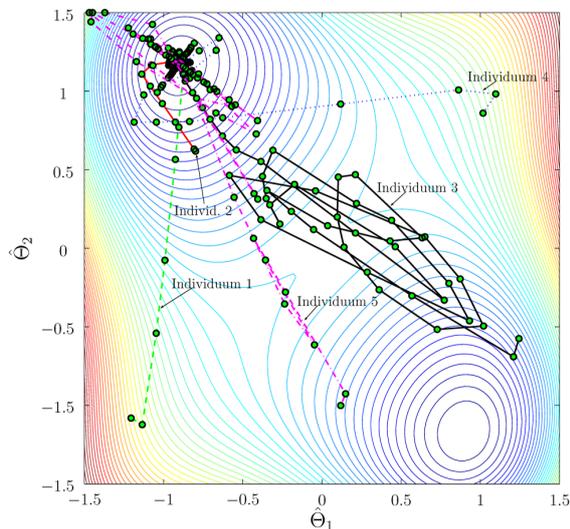


Abbildung 5.8: Beispielhaftes Höhenbild der Particle Swarm Optimization (PSO) [68]

Im Vergleich zum HJ-Tastverfahren kann durch mehrere Suchstrecken ein größeres Suchfeld aufgespannt und abgesucht werden. Vorteil dieses Algorithmus gegenüber dem HJ-Tastverfahren ist das schnellere und eindeutiger Auffinden eines globalen Minimums. Beim HJ-Algorithmus besteht die Gefahr, dass sich durch Änderung eines Parameters die Suche auf ein lokales Minimum begrenzt und der Suchvorgang an dieser Stelle stagniert. Es kann somit nicht garantiert werden, dass das globale Minimum gefunden wurde.

Ein weiterer wesentlicher Unterschied beider Optimierungsverfahren ist die Reproduzierbarkeit der Lösungswege. Da das HJ-Tastverfahren auf einem deterministischen Prinzip basiert und einzelne Werte nach einem festen Muster geändert werden, wird dieses Verfahren bei gleichen Eingangswerten stets die gleichen Ergebnisse mithilfe des gleichen Lösungsweges produzieren. Stochastische Verfahren wie die PSO variieren ihre Parameter zufällig und produzieren somit stets unterschiedliche Lösungswege. [68]

Im Rahmen dieser Arbeit wird kein energieautarkes Gebäude betrachtet, sondern vielmehr das Ziel verfolgt, den Einsatz von regenerativen Energien und die Umsetzung zu einer nachhaltigen Wärme- und Kältegewinnung am Gebäude zu erhöhen.

Das Ziel der energetischen Anlagenoptimierung ist es, innerhalb einer Fragestellung die beste Lösung für ein Problem unter einer Vielzahl an möglichen Alternativen aufzudecken. In der vorliegenden Arbeit wird unter simulationsbasierter Optimierung ein automatisiertes Verfahren auf Basis numerischer Simulation und mathematischer Optimierung verstanden. [74] [77]

5.4 Kurzzusammenfassung

Mithilfe einer Zielfunktion wird durch Variation mehrerer Parameter das optimale Ergebnis einer Problemstellung ermittelt. Zur Lösung des Problems werden deterministische und stochastische Optimierungsverfahren herangezogen. Ziel hierbei ist es, mit geringem Aufwand ein globales Optimum innerhalb des Ergebnisraums aufzudecken.

6 Stand der Forschung – Optimization in Building Science

Die mathematischen Grundlagen aus Kapitel 5 wurden bereits in den 1950er Jahren und früher aufgestellt. Computer- und simulationsbasierte Optimierung wurde erstmals 1986 von Jonathan Wright erwähnt. Hier wurde anhand gebäudetechnischer Systeme gezeigt, dass der Einsatz numerischer Optimierungsalgorithmen eine schnelle Bewertung und Dimensionierung in Abhängigkeit unterschiedlicher Kriterien, wie z.B. geringe Investitionskosten, geringe Betriebskosten etc. liefern kann. [78]

Die Bedeutung optimierter Gebäude- und Anlagenkonzepte hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen und ist im Umfeld energieeffizienter und nachhaltiger Planungsprozesse unumgänglich. Bedingt durch die Digitalisierung des Bauwesens hat sich die Anzahl der Veröffentlichungen zum Thema „Optimization in Building Science“ in der letzten Dekade deutlich erhöht. Abbildung 6.1 zeigt die Anzahl jährlicher wissenschaftlicher Journalbeiträge von 1984 bis 2017. Der Anstieg und die daraus folgende Bedeutung der Thematik ist anhand dieser Abbildung gut erkennbar. Neben einem wachsenden Interesse an dieser Thematik stehen die schnelle Ergebnisermittlung sowie der verhältnismäßig geringe Aufwand zur Abbildung komplexer Systeme im Vordergrund.

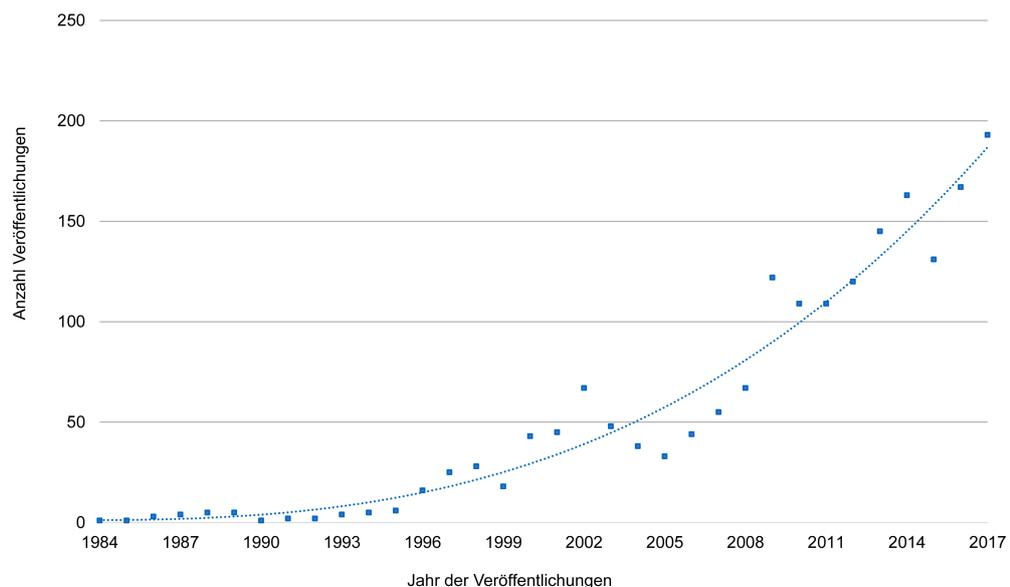


Abbildung 6.1: Veröffentlichungen zum Thema „Optimization in Building Science“ nach [79] in Anlehnung an [74]

Einen allgemeinen Überblick über angrenzende Fachbereiche zu dieser Arbeit, die sich ebenfalls mit der Thematik und Anwendung von Optimierungsverfahren beschäftigen, wird in Abbildung 6.2 dargestellt. Die Graphik verdeutlicht das breite Einsatzgebiet von Optimierungsverfahren von der Energiegewinnung (Power Plant Optimization) über Optimierungen des Energieversorgungssystems (Grid Optimization) bis hin zu allgemeinen optimierungsbedingten Fragestellungen am Gebäude (Building Design Optimization, Sustainable Energy Design und Energie Efficiency). Nachfolgend wird der Fokus auf Anwendung und Weiterentwicklung von Optimierungsprozessen im Umfeld gebäudetechnischer Anlagen sowie dem Fokus auf erneuerbare Energiegewinnung eingegangen.

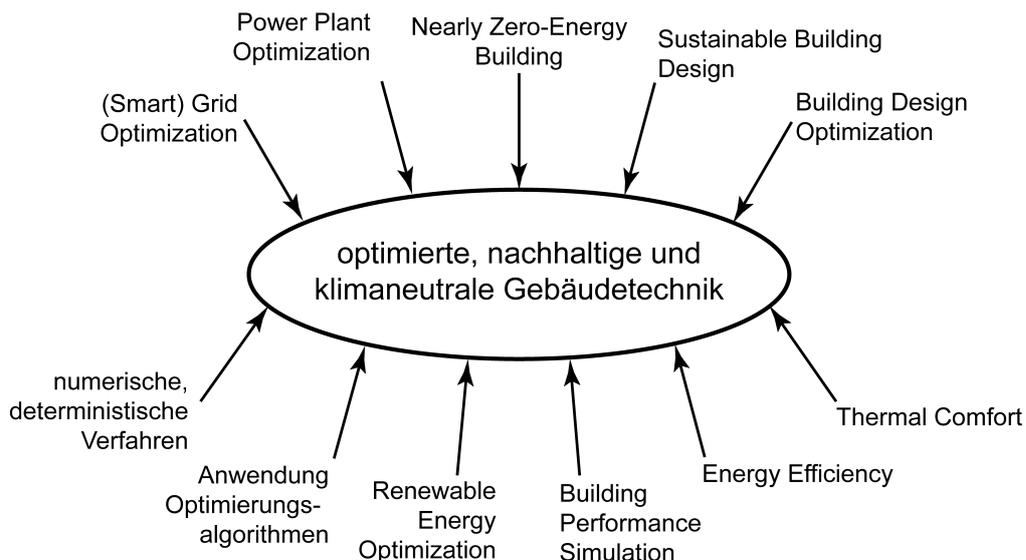


Abbildung 6.2: Angrenzende Themenfelder von Optimierungsverfahren

Optimierungsverfahren innerhalb von Gebäude- und Anlagensimulationen dienen in erster Linie der Analyse von thermischem und energetischem Verhalten, Umweltauswirkungen und der Verbesserung des Wohnraumklimas. Hierfür sollen die optimierten Betriebsbedingungen aufgedeckt werden [80] [81]. Dabei handelt es sich aus mathematischer Sicht um das Auffinden der besten Lösung (bestmöglicher Output der Simulation) aus einer Vielzahl an vorhandenen Alternativen (Variation des Inputs) [74].

Mithilfe dieser Methoden können energetische Analysen des Gebäudes und der Anlagentechnik durchgeführt und gleichzeitig bestimmt werden, ob sich der Nutzer im Innenraum des Gebäudes wohlfühlen wird. Darüber hinaus lassen sich Aussagen über Investitions- bzw. Betriebskostenoptimierung treffen.

Die Frage nach einem geeigneten Optimierungsalgorithmus wirft jedoch einige Fragen auf, die es vorab zu klären gibt. So wurde gezeigt, dass eine Vielzahl an möglichen Optimierungsalgorithmen zum Einsatz kommen kann, die jedoch nicht zu einem einheitlichen Ergebnis führen. Die meisten Optimierungsprobleme innerhalb eines simulationsbasierten Ansatzes sind grundsätzlich nicht linear, multimodal (mehr als ein Optimum vorhanden), nicht stetig (die Funktion weist Sprünge in ihrem Verlauf auf) und daher nicht differenzierbar (ableitbar)

[82]. Dies hängt jedoch wesentlich von der Wahl und Definition der Zielfunktion ab. Im Umfeld thermisch-energetischer Gebäudesimulationen sind die Abhängigkeiten vom vorherrschenden Außenraumklima sowie von thermodynamischen Prozessen innerhalb des Anlagensystems vorhanden. Aus diesem Grund ist es theoretisch möglich, zu jedem Zeitpunkt x und einer Außentemperatur y exakt eine Lösung für die Zielfunktion zu ermitteln. Die geeignete Wahl der Zielfunktion spielt hierbei eine entscheidende Rolle.

6.1 Aktueller Forschungsstand

Nachfolgend werden wissenschaftliche Untersuchungen aufgeführt, die sich mit der Thematik der Optimierung im Umfeld von gebäude- und anlagentechnischer Simulation beschäftigen. Aus diesen Veröffentlichungen werden geeignete Optimierungsverfahren und Sensitivitätsanalysen für gebäudetechnischer Anlagen im Kontext energieeffizienter und nachhaltiger Gebäude ermittelt. Darüber hinaus werden die Zielfunktionen der einzelnen Untersuchungen genauer betrachtet. Dieser Überblick dient als Grundlage zur Aufstellung der Forschungsfrage und Forschungshypothese (vgl. Kapitel 6.2).

Im Jahr 2011 haben Banos, Manzano-Qgugliaro, Montoya, Gil, Alcayde und Gomez einen Bericht über erneuerbare und nachhaltige Energiegewinnung unter Anwendung von Optimierungsmethoden veröffentlicht. Dabei geben sie einen Überblick über bereits veröffentlichte Forschungen aus den Bereichen Wind-, Solar-, Wasserkraft- und Bioenergie sowie über geothermische und hybride Systeme zur regenerativen Energiegewinnung unter Anwendung geeigneter Optimierungsalgorithmen. Sie zeigen die Potentiale der Anwendung von Optimierungsalgorithmen durch verschiedene Veröffentlichungen auf und gehen detailliert auf die Anwendung solar gewonnener Energie ein. Eine Erkenntnis ihrer Arbeit ist die steigende Bedeutung von Optimierungsalgorithmen zur Lösung von Fragestellungen im Rahmen erneuerbarer Energien. Dabei werden zwei Ansätze verfolgt: eine herkömmliche und eine modernere Herangehensweise an die Problemstellung. Die herkömmliche Herangehensweise versucht mithilfe ganzzahliger Inputs lineare Problemstellungen zu lösen. Dies ist jedoch verhältnismäßig zeitaufwändig. Die modernere Variante versucht das Problem mit heuristischen Verfahren (z.B. generische Algorithmen oder Particle Swarm Optimization (PSO)) zu lösen. Hierbei wird versucht, mit begrenztem Wissen und einem geringen Zeitaufwand zu einem plausiblen Resultat zu kommen. Die Outputs der stichprobenartigen Simulation werden mit Erfahrungswerten verglichen und deren Güte bestimmt. [66]

Eine weitere Veröffentlichung aus dem Jahr 2014 von Iqbal, Azam, Naeem, Khwaja und Anpalagan gibt einen Überblick über die Klassifizierung von Optimierungen, unterschiedliche Algorithmen sowie geeignete Tools, die im Themenbereich „Erneuerbare Energie“ Anwendung finden. Vergleichbar mit Banos et al. konnten auch sie ein steigendes Interesse innerhalb der Forschungsaktivitäten bzgl. des Einsatzes von Optimierungsmethoden feststellen. Iqbal et al. fokussieren sich in ihrer Arbeit auf unterschiedliche Input- und Outputmöglichkeiten sowie variierende Zielfunktionen und Randbedingungen der Simulationen, die zu optimierten

Ergebnissen führen. Hierzu zeigen sie unterschiedliche Arten der linearen und nicht-linearen Optimierung auf. Aus ihrer Untersuchung wird deutlich, dass die bis dahin getätigten Forschungen sich stets auf eine erneuerbare Energiequelle beziehen und keine Forschung alle Arten der regenerativen Energiegewinnung abdeckt. So existiert gegenwärtig kein Ansatz die geeignetste Energiequelle zur energetischen Versorgung von Gebäuden numerisch ermitteln zu können. Sie unterteilen das Optimierungsvorgehen in vier wesentliche Teile: Input, Output, Zielfunktion und Randbedingungen. Die Inputs sind stets variabel und haben somit Einfluss auf die Outputs. Wie bereits erwähnt, sollte eine klar definierte Zielfunktion gewählt werden, um die Ergebnisse (Outputs) bewerten und vergleichen zu können. Sie zeigen Konflikte bei der Kombination unterschiedlicher Zielfunktionen auf. Darüber hinaus müssen die Randbedingungen der Simulation klar definiert sein und der Fokus muss treffend auf die relevanten Variablen ausgerichtet sein. [83]

Die Wahl des geeigneten Optimierungsalgorithmus ist ein wesentlicher Faktor, um die größte Reduzierung der Zielfunktion zu erzielen [84]. Optimierungsalgorithmen, die eine glatte Funktion ohne Sprünge fordern, können an einer un stetigen Zielfunktion scheitern und nicht das geforderte Optimum ermitteln [85]. Steigt die Komplexität der Optimierungsfrage (z.B. durch eine steigende Anzahl an Zielfunktionen), steigt auch die Wahrscheinlichkeit einer un stetigen Zielfunktion.

Einen vielversprechenden Ansatz liefert eine Untersuchung von Michael Wetter und Elijah Polak aus dem Jahr 2004. Sie gehen davon aus, dass in der thermischen Gebäudesimulation numerische Annäherungen (mathematische Funktionen zur Ermittlung des Ergebnisses) in der Regel un stetig sind, jedoch zahlreiche Optimierungsverfahren eine stetige Zielfunktion voraussetzen und somit Ergebnisse liefern, die weit von einem Optimum entfernt sind. Durch die Kombination einer ersten stochastischen und einer nachfolgenden deterministischen Optimierung können sie die Rechenzeit um 65 % reduzieren. Dabei deckt die stochastische Optimierung den Bereich auf, indem sich das globale Optimum befindet. Die anschließende deterministische Optimierung startet am Ergebnis der stochastischen Optimierung und liefert das tatsächliche globale Optimum. Sollte jedoch die Zielfunktion an dieser Stelle nicht stetig sein, wird der angewandte Algorithmus nicht das gewünschte Ergebnis liefern. [86]

Bereits in einer vorangegangenen Untersuchung konnten Michael Wetter und Johnathan Wright die Kombination aus verschiedenen Optimierungsalgorithmen anhand drei unterschiedlicher Gebäudestandorte (Houston, Chicago und Seattle) als sinnvoll nachweisen. Der jährliche Primärenergiebedarf für Beleuchtung, Lüftung, Heizen und Kühlen wurden als Zielfunktion der Cost Function hinterlegt. Hierbei haben sie den Hooke-Jeeves Algorithmus (HJ)-Algorithmus (als Vertreter der Generalized Pattern Search Algorithmen; ein deterministisches Verfahren) und den simple Genetic Algorithmus (als Vertreter der genetischen Algorithmen; ein stochastisches Verfahren) miteinander kombiniert. Der HJ-Algorithmus ist dabei nicht zwingend in der Lage das globale Minimum zu erfassen. Es besteht die Möglichkeit, dass er sich in einem lokalen Minimum festläuft. Wenn die Zielfunktion nicht stetig ist, kann dieser Algorithmus an der Diskontinuität der Zielfunktion scheitern (vgl. hierzu Kapitel 5.2). Der simple Genetic Algorithmus startet an mehreren Stellen in der Fläche der Zielfunktion gleichzeitig. Dadurch wird

ausgeschlossen, dass sich dieser Algorithmus in einem lokalen Minimum festsetzt (vgl. hierzu Kapitel 5.3). Als Untersuchungsgegenstand haben sie ein Bürogebäude mit 13 unterschiedlichen Parametern (u.a. Höhe und Breite der Fenster, Größe des Verschattungsüberhangs, Lufttemperaturen, etc.) herangezogen mit dem Ziel, den jährlichen Primärenergiebedarf des Gebäudes zu reduzieren. Durch die kombinierte Anwendung der beiden Optimierungsverfahren konnten sie den Primärenergiebedarf zwischen 7% und 32% reduzieren. Bei der Betrachtung der Berechnungszeit wurde deutlich, dass der simple Genetic Algorithm schneller zu einem Minimum führt. [82]

Wetter und Wright vergleichen unterschiedliche Optimierungsalgorithmen anhand eines einfachen Bürogebäudes. Die besten Ergebnisse liefert ein Hybrid-Algorithmus bestehend aus einem PSO-Algorithmus und einem HJ-Algorithmus. Hierbei wird in einem ersten Schritt eine PSO durchgeführt und in einem zweiten Schritt die HJ-Optimierung gestartet. Der niedrigste ermittelte Wert der PSO wird als Ausgangswert für die HJ-Optimierung angesetzt. Somit kombinieren sie ein stochastisches Verfahren gefolgt von einem deterministischen Verfahren. Der stochastische Algorithmus (PSO) liefert hierbei ein schnelles Aufdecken eines Bereichs, in dem sich das globale Optimum befinden sollte. Es ist nicht gewährleistet, dass es sich bei dem finalen Ergebnis der PSO auch tatsächlich um das globale Optimum handelt. Um dies anschließend exakt bestimmen zu können, wird das Resultat der PSO als Startpunkt für eine deterministische Optimierung definiert. Dadurch kann die Zielfunktion numerisch gelöst und das globale Optimum identifiziert werden. [85]

Eine Studie aus Taiwan zeigt, dass durch Anwendung einer hybriden Optimierung innerhalb eines thermischen Simulationsprogrammes der Primärenergieaufwand eines Kühlwassersystems deutlich reduziert werden kann. Hierbei wird ein ähnliches Vorgehen, wie bei der vorangegangenen Studie verfolgt. Lee und Cheng ziehen für ihre Betrachtung ein typisches, taiwanesisches Bürogebäude als Untersuchungsgegenstand heran. Die Untersuchung hatte zum Ziel, mithilfe eines Kühlwassersystems (Verdunstungskühlung mit Kühltürmen) den Primärenergiebedarf zur Kühlung des Bürogebäudes zu reduzieren. Der minimale Primärenergiebedarf stellt hierbei die Zielfunktion dieser Studie dar. Als Variablen setzten sie die Solltemperaturen des gesamten Systems. Mithilfe der hybriden Optimierung (bestehend aus einer PSO und einem HJ) soll das optimierte Zusammenspiel der Solltemperaturen aufgedeckt werden. Dabei betrachten sie je vier Tage im Sommer und 4 Tage im Winter. Durch die Optimierung des Systems lassen sich im Sommer 9,4% und im Winter 11,1% an Primärenergie einsparen. Dadurch lassen sich signifikante Einsparungen im Energieverbrauch realisieren. [87]

Eine finnische Studie zeigt, dass der Heizenergiebedarf eines Wohngebäudes durch die Kombination aus energetisch-thermischer Simulation (IDA ICE 3.0) und Optimierungswerkzeugen (Generic Optimization Program (GenOpt) 2.0) zwischen 23% und 49% gegenüber einem Referenzgebäude gesenkt werden kann. Hierbei dient die Minimierung der Lebenszykluskosten als Zielfunktion der Optimierung. Es werden fünf Variablen in der Simulation definiert. Zwei Variablen (U-Wert der Fenster, Wärmerückgewinnung in der Lüftungsanlage) werden als Variablen mit diskreten Werten definiert. Die restlichen drei Variablen (Dicke der

Außenwand-, Boden- und Dachdämmung) werden als stetige Variablen definiert. Es zeigt sich, dass eine Investition in die isolierende Gebäudehülle (Fenster und Außenwanddämmung) sich positiv auf die Lebenszykluskosten auswirkt. Daraus folgt, dass unter optimierten Bedingungen mehr Energie eingespart werden kann, als für die isolierende Gebäudehülle investiert werden muss. [88]

Delgarm et al. vergleichen in ihrer Untersuchung Optimierungsverfahren mit einer und mehreren Zielfunktionen mithilfe eines EnergyPlus Modells. Es werden Zielfunktionen für die Minimierung des Heiz- sowie des Kühlbedarfs und die elektrische Beleuchtung definiert. Als Variablen werden baukonstruktive Parameter (u.a. Verschattungselemente, Orientierung des Raumes, Größe des Fensters, etc.) in EnergyPlus gesetzt. Zusammengenommen entspricht die Zielfunktion einer *multi-objective optimization*, da hier das Optimum aus mehreren Zielfunktionen gleichzeitig gesucht wird. Übergeordnetes Ziel ist hierbei die Reduzierung des jährlichen Energiebedarfs eines Referenzraums im Iran. In einem ersten Schritt wird jede Zielfunktion einzeln untersucht. Dabei stellen sie fest, dass die Resultate der einzelnen Zielfunktionen diametral zueinander verlaufen. In der Optimierung wird die Orientierung des Raumes mitbetrachtet und führt zu dem widersprüchlichen Resultat, dass mit Fokus auf den Kühlenergiebedarf die Orientierung des Raumes nach Westen und mit Fokus auf den Heizenergiebedarf des Raumes die Orientierung nach Süden ausgerichtet ist. Wird der Fokus ausschließlich auf die Minimierung des Kühlenergiebedarfs gelegt, steigen der Heizenergiebedarf und der elektrische Energiebedarf für Beleuchtung deutlich an. Bei der Betrachtung mehrerer Zielfunktionen gleichzeitig (in diesem Fall *triple-objective optimization*) wird eine Pareto-Front zur Visualisierung herangezogen (vgl. Abbildung 6.3). Diese zeigt auf den drei Achsen jeweils die entsprechende Zielfunktion dieser Betrachtung. Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass die Verringerung einer Zielfunktion negative Auswirkungen auf die anderen beiden Zielfunktionen hat und diese ansteigen lassen. Delgarm et al. halten in ihrer Untersuchung fest, dass es nicht möglich ist, alle Zielfunktionen gleichzeitig (weder mit zwei noch mit drei Zielfunktionen) zu minimieren. [89]

Eine Untersuchung aus dem Jahr 2010 betrachtet die energetische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit von solaren Heiz- und Kühlkonzepten an drei unterschiedlichen Orten in Italien. Um einen optimierten Betrieb umzusetzen, erstellen sie in Transient Systems Simulations (TRNSYS) ein Modell und berücksichtigen sechs Parametern (u.a. Fläche des Solarkollektor, Massenstrom der Kollektorfläche) berücksichtigt. Diese optimieren sie anschließend mithilfe des HJ-Algorithmus. Als Zielfunktion dient hierbei die Reduzierung der Investitionskosten. Mit ihrer effizienten und optimierten Anlagentechnik können sie 64,7% der Primärenergie einsparen. Es sei jedoch erwähnt, dass bereits vor Durchführung der Optimierung erhebliche Einsparungen durch effiziente Anlagentechnik erzielt werden konnten. [90]

Asadi et al. optimieren in ihrer Untersuchung die Sanierungskosten, die Energieeinsparungen sowie die thermische Behaglichkeit eines Wohngebäudes unter Verwendung von TRNSYS, GenOpt und einer Tchebycheff-Optimierung. Die Einsparungen und Kosten sowie die Behaglichkeit werden hierbei als Zielfunktion festgehalten. Da es sich um mehrere Zielfunktionen handelt, spricht man von einem *multi-objective optimization* Modell. Dabei besteht die Schwie-

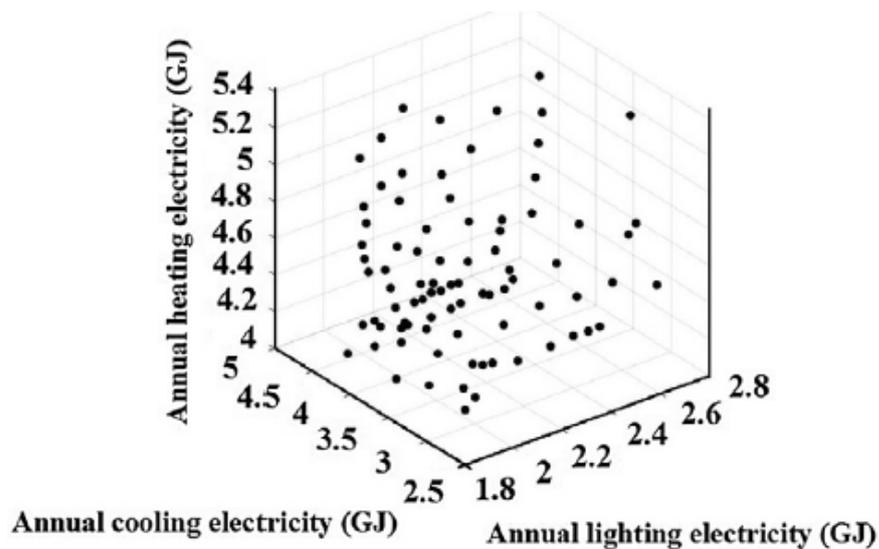


Abbildung 6.3: Pareto-Front einer Optimierung mit 3 Zielfunktionen (jährlicher Heiz-, Kühl- und elektrischer Lichtenergiebedarf) nach [89]

rigkeit in den sich konkurrierenden Zielfunktionen. Als Parameter wählten sie baukonstruktive und technische Eigenschaften des Untersuchungsgegenstandes. Hierzu zählten Materialien zur Dämmung der Gebäudehülle (Wand und Dach), unterschiedliche Festerarten sowie unterschiedliche Arten von Solarkollektoren. In diesem Fall ist es allerdings nicht möglich, das Gebäude zu einem befriedigenden Optimum zu führen. Bei der Betrachtung der einzelnen Zielfunktionen wurde deutlich, dass z.B. bei der Optimierung der Sanierungskosten Materialien mit niedrigen Kosten ausgewählt wurden, die jedoch die geringsten energetischen Einsparungen bringen. [91]

Zahlreiche Untersuchungen beschäftigen sich mit den Vor- und Nachteilen unterschiedlicher Optimierungswerkzeuge und zeigen, dass sowohl stochastische wie auch nichtlineare Optimierungsverfahren in Kombination mit Cost Function Optimization zu belastbaren Ergebnissen führen. Wesentliche Ergebnisse dieser Untersuchungen sind die Optimierung des Planungsablaufs sowie das Generieren von aussagekräftigen und stabilen Ergebnissen in der Gebäudesimulation zur Realisierung von Nearly Zero Energy Buildings (nZEB). [67] [74] [85] [92] [93] [94] [95] [96] [97] [98] [99] [100] [101]

Kämpf, Wetter und Robinson versuchen mithilfe von Metaheuristiken ein Optimierungsproblem zu lösen. Hierzu vergleichen sie zwei hybride Algorithmen miteinander. Beide haben auch hier das Ziel, ein globales Minimum aufzudecken. Die Kombination aus einem PSO- und einem HJ-Algorithmus liefern für einfache Zielfunktionen das globale Optimum. [102]

Weitere Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz von Optimierungswerkzeugen Potential zur Realisierung von Nearly Zero Energy Buildings bzw. Net Zero Energy Buildings bietet. Es konnten sowohl effizienzsteigernde wie auch kostensenkende Maßnahmen mithilfe von Optimierungsverfahren ermittelt und durchgesetzt werden. [77] [103] [104] [105]

Die Dissertation von Lindauer (2017) zeigt anhand von Gebäude- und Quartiersmodellen eine entwickelte Methodik zur Sensitivitätsanalyse, die an die Charakteristik von Quartiersmodellen

angepasst ist. Dabei wird die Dynamik der Parameter und Zielgrößen berücksichtigt. Hierzu werden Stärken und Schwächen bekannter Sensitivitätsanalyse (SA) aufgezeigt und in einer eigenen Methodik verarbeitet. In dieser Untersuchung werden – neben den Parametern Luftwechsel, Solltemperatur und den thermischen Eigenschaften der Bauteile – anlagentechnische Parameter als einflussreiche Stellschraube identifiziert. [106]

Hopfe (2009) zeigt in ihrer Dissertation die Einsatzmöglichkeiten von Sensitivitätsanalysen im Rahmen von Gebäudesimulationen auf. Dabei geht sie auf Optimierungen mit mehreren Zielgrößen ein und zeigt mehrere Arten, um Sensitivitäten zu identifizieren. Zu den Zielgrößen zählen der jährliche Energiebedarf für Heizen und Kühlen sowie der thermische Komfort im Innenraum eines Einzelgebäudes. Bei der Betrachtung wird deutlich, dass die Infiltration des Gebäudes den einflussreichsten Parameter darstellt. [107]

Mit der Sanierung des Gebäudebestands beschäftigt sich die Dissertation von Maderspacher (2017). Es wird eine Methode zur robusten Optimierung für die energetische Sanierung von Gebäuden vorgestellt. Die Methode erlaubt den Einsatz mehrerer Zielgrößen. Dabei werden unsichere Randbedingungen betrachtet und ein robustes Optimum, das lediglich gering auf die Änderung von Eingangsparametern reagiert, identifiziert. Die robuste Optimierung wird mithilfe eines PSO-Algorithmus durchgeführt. Es kann gezeigt werden, dass durch Einsatz dieser Methode eine Minimierung der Zielgrößen Treibhausgasemissionen und Kapitalwert im Vergleich zu einer herkömmlichen Sanierung nach EnEV erzielt werden kann. [108]

Der Überblick über den aktuellen Stand der Forschung zeigt, dass gebäudetechnische Komponenten stets zu den einflussreichsten Parametern innerhalb der Anlagen- und Gebäudesimulation zählen. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass mehrheitlich deterministische Verfahren (z.B. PSO-Algorithmen) zur Lösung komplexer Fragestellungen herangezogen werden, da hier der zeitliche Aufwand geringer ausfällt. Hierbei finden überwiegend mehrdimensionale Zielfunktionen zur Optimierung mehrerer Fragestellungen parallel Anwendung (z.B. Optimierung des Primärenergiebedarfs bei gleichzeitig optimierter Inanspruchnahme von Ressourcen).

Die angesprochenen Untersuchungen haben gezeigt, dass Optimierungswerkzeuge wesentlich dazu beitragen können, Planungsvorgänge zeitlich zu optimieren. Sie zeigen Wege zur Umsetzung von Niedrigstenergiegebäuden sowie den Einsatz von regenerativen Energien auf. Darüber hinaus werden Optimierungsverfahren häufig zur Reduzierung der Betriebs- und Investitionskosten herangezogen. Dabei betrachten die meisten Forschungen nur eindimensionale Optimierungen, indem sie lediglich eine Zielfunktion definieren und diese optimieren. Mehrdimensionale Optimierungen betrachten zwei und mehr Zielgrößen. Z.B. kann hier der Einsatz von regenerativen Energien bei minimalen Umweltwirkungen betrachtet werden. Da mehrere Zielfunktionen ungünstigerweise meist korrelieren, ist es zu empfehlen, eine eindeutige Zielfunktion zu definieren, dessen stetiger Verlauf wahrscheinlich ist. Je höher die Anforderungen an den Optimierungsprozess, desto ungenauer kann dieser beschrieben werden.

In den betrachteten Untersuchungen spielt die Definition der Zielfunktion eine untergeordnete Rolle. Zum Beispiel kann die Zielfunktion in einer Untersuchung mehrere Optima aufweisen,

die zu gleichen Ergebnissen des Outputs führt [88]. Allein bei der Betrachtung der isolierenden Gebäudehülle können variierende Werte für die opaken und transparenten Bauteile zu gleichen Resultaten führen. Es sollte demnach darauf geachtet werden, dass eine Zielfunktion so definiert wird, dass zu jeder Variation der Parameter nur exakt ein Ergebnis erzielt werden kann.

Die Verfahren der Anlagen- und Gebäudeoptimierung ersetzen hierbei nicht das nötige Fachwissen aller am Planungsprozess beteiligten Akteure. Es unterstützt sie jedoch in der Umsetzung von nachhaltigen und energieeffizienten Gebäuden durch Zeiteinsparung sowie dem Aufzeigen von optimierten Betriebszuständen.

6.2 Forschungsfragen und Forschungshypothese

Die Forschungsfragen, die sich aus dem aktuellen Stand der Forschung sowie den anerkannten Regeln der Technik stellen, lauten:

- *Wie muss die Zielfunktion definiert sein, um ein Optimum innerhalb eines Optimierungsverfahrens zu erzielen?*
- *Ist es möglich, ein adaptives Anlagen- und Gebäudemodell so in eine Simulationsumgebung einzubinden, dass es Optimierungsprozesse für variierende Gebäude- und Anlagenkonzepte erlaubt?*
- *Kann der Planungsprozess komplexer Technikkonzepte (z.B. Einsatz von regenerativen Energien, Realisierung von Nearly Zero Energy Buildings, etc.) mithilfe neuer Planungswerkzeuge zeitlich verkürzt und dadurch optimiert werden?*
- *Kann der Wärme- und Kühlbedarf eines Gebäudes mithilfe sensibler Thermischer Energiespeicher und handelsüblicher Solarkollektoren reduziert und minimiert werden?*

Aus den Betrachtungen der vorangegangenen Kapitel sowie den aufgeführten Fragestellungen lässt sich nachfolgende Forschungshypothese ableiten. Diese Hypothese gilt es innerhalb dieser Arbeit auf ihre Gültigkeit hin zu überprüfen.

Durch Anwendung von Sensitivitätsanalysen und Optimierungswerkzeugen lässt sich die Dimensionierung der Anlagentechnik verbessern, sodass eine energieeffiziente und thermisch-regenerative Konditionierung des Innenraums realisiert werden kann.

6.3 Kurzzusammenfassung

Die steigende Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen zeigt das wachsende Interesse an Optimierungsverfahren im Rahmen von nachhaltigen und klimaneutralen Gebäudekonzepten. Diese dienen zur Verbesserung des thermischen und energetischen Verhaltens, zur Reduzierung der Umweltwirkungen sowie zur Steigerung der Behaglichkeit im Innenraum. Aus dem aktuellen Stand der Forschung wird ersichtlich, dass die richtige Wahl des Optimierungsverfahrens wesentlich von der aufgestellten Zielfunktion abhängig ist. Eindimensionale Optimierungen sind vorzuziehen, da mehrdimensionale Optimierungen meist zu entgegengesetzten Resultaten führen.

7 Beschreibung des Simulationsmodells und des methodischen Vorgehens

Dieses Kapitel dient zur Beschreibung des Untersuchungsgegenstands sowie der zu untersuchenden Anlagen- und Regelungstechnik. Das Heiz- und Kühlkonzept basiert auf einer regenerativen Energieversorgung. Das beschriebene Vorgehen identifiziert die einflussreichsten Parameter auf die Resultate der Anlagen- und Gebäudesimulation mithilfe von Sensitivitätsanalyse (SA). Um die zu untersuchende Hypothese verifizieren bzw. falsifizieren zu können, wird im Folgenden ein Modell zur thermisch-energetischen Simulation in der Simulationsumgebung Transient Systems Simulations (TRNSYS) aufgebaut sowie ein erfolgversprechendes Anlagenmodell zur klimaneutralen Konditionierung des Innenraums erarbeitet. Das Kapitel dient der Beschreibung und Konzipierung aller relevanten Rahmenbedingungen und Annahmen, die in den vorangegangenen Kapiteln näher betrachtet wurden. Neben den bauphysikalischen und technischen Anforderungen wird die Regelungstechnik genauer betrachtet. Die daraus resultierende Ausgangssituation entspricht hierbei den anerkannten Regeln der Technik und wird im Rahmen dieses Kapitels einer SA nach Morris unterzogen.

Ziel dieser Untersuchung ist es, ein behagliches Innenraumklima durch ausschließliche Nutzung regenerativer Energien zu realisieren. Dabei wird Wärme mithilfe von Solarkollektoren erzeugt. Durch Einsatz von Solarabsorbern wird Wärme an die Umgebung abgestrahlt und somit Kälte zum Betrieb der Deckenkühlung gewonnen. In Abhängigkeit des Außenklimas wird eine entsprechende Anlagenregelung vorgestellt. Darüber hinaus werden, im Gegensatz zu anderen Veröffentlichungen, nicht die baukonstruktiven Elemente, sondern die gebäudetechnischen Anlagenkomponenten mit Parametern versehen und nach einer definierten Zielfunktion (CFO) optimiert. Es wird ein Modell entwickelt, das eine Übertragbarkeit des Vorgehens auf Fragestellungen des optimalen Einsatzes regenerativer Energien im Umfeld thermisch-energetischer Gebäudesimulationen erlaubt.

In Kapitel 5 wurde gezeigt, dass es eine Vielzahl an intelligenten Verfahren zur Lösung und Optimierung nichtlinearer Fragestellungen gibt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein nichtlineares Verfahren (Hooke-Jeeves Algorithmus (HJ)) sowie ein stochastisches Verfahren (Particle Swarm Optimization (PSO)) zur Lösung der Zielfunktion (CFO) herangezogen. Die Zielfunktion wird so definiert, dass durch Einsatz beider Verfahren ein eindeutiges Optimum gefunden werden kann.

Das beschriebene Vorgehen hat das Ziel, Entscheidungen über den Einsatz regenerativer Energien in den ersten Leistungsphasen zu unterstützen sowie den Planungsprozess gebäudetechnischer Anlagen zu verbessern. Parameter, die einen erheblichen Einfluss auf das

Ergebnis haben, werden so frühzeitig identifiziert. Dieses Vorgehen bietet die Grundlage für die Durchführung von Optimierungsprozessen zur Identifikation einer optimierten Anlagen- und Gebäudetechnik. Im nachfolgenden Kapitel werden weitere Szenarien bzgl. Klima, Nutzeranforderungen und technischer Gebäudeausstattung untersucht und Erkenntnisse zu den ersten Leistungsphasen gewonnen (vgl. Kapitel 8).

7.1 Modelldefinition und Implementierung in ein Gebäudesimulationsprogramm

Um niedrige Rechenzeiten zu erzielen, wird auf ein vereinfachtes Gebäudemodell in Form eines Referenzraums zurückgegriffen. Dieser kann auf variierende Gebäudegrößen skaliert und die Anlagentechnik kann entsprechend angepasst werden. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird der Referenzraum sowie die dazugehörige Anlagen- und Gebäudetechnik vorgestellt. Darüber hinaus werden die Regelung der Anlagentechnik sowie alle Randbedingungen dargestellt.

7.1.1 Baukonstruktive Randbedingungen

Als kleinste Einheit eines Gebäudes wird ein einzelner Raum als Einzonenmodell gewählt, um die Rechenzeit möglichst gering zu halten und den Fokus auf das Vorgehen zur Untersuchung und Optimierung der Anlagentechnik zu setzen. Außerdem können so Skalierungen auf ein Gesamtgebäude sowie auf Quartiersebene realisiert werden. Hierdurch lassen sich spezifische Abhängigkeiten, bedingt durch die zu beheizende bzw. zu kühlende Fläche, ermitteln.

Das Untersuchungsobjekt wird entsprechend den Forderungen der Arbeitsstättenrichtlinie entworfen [109]. Demnach soll ein büroähnlicher Arbeitsraum für eine Person mindestens 8,00 m² Fläche aufweisen. Tabelle 7.1 fasst die Randbedingungen der Raumdimensionierung zusammen. Unter diesen Randbedingungen wird der Raum im TRNSYS Type 56 nachgebildet.

Tabelle 7.1: Randbedingungen des Untersuchungsgegenstands

Randbedingung	Dimension
Grundfläche	11,18 m ² (2,60 m * 4,30 m)
lichte Raumhöhe	3,00 m
Volumen	33,54 m ³
Fensterfläche	5,20 m ² (Fensterflächenanteil 67 %)
Orientierung	Süd

Um die Vorgaben zu Niedrigstenergiegebäuden aus Kapitel 4.2 einhalten zu können, wurden folgende Randbedingungen an die opake Gebäudehülle angenommen und als konstante Randbedingung behandelt:

7.1 Modelldefinition und Implementierung in ein Gebäudesimulationsprogramm

- Wärmeleitfähigkeit: 0,252 kJ/hmK
- Wärmespeicherkapazität: 1 kJ/kgK
- Dichte: 70 kg/m³

Abbildung 7.1 zeigt den Grundriss und ein Rendering des Untersuchungsgegenstands mit entsprechender Dimensionierung. Die Nachbarräume sowie darüber und darunter liegende Räume werden als beheizte Büroräume angenommen, sodass die angrenzenden Raumelemente als adiabat angenommen werden können. Der Fußboden sowie die Decke sind mit thermisch-aktiven Bauteilschichten zur Beheizung bzw. Kühlung des Raumes ausgestattet.



Abbildung 7.1: Grundriss und Rendering der Untersuchungsgegenstands

7.1.2 Innenraumklima und Gebäudenutzung

Anhand eines fiktiven Modells wird eine vereinfachte Nachbildung eines Einzonenmodells erstellt. Innerhalb dieses Modells werden alle Prozesse abgebildet und visualisiert. Für erste Betrachtungen ist es hilfreich, den Nutzer eines Gebäudes als möglichst konstant anzunehmen. Dies ermöglicht es, den Fokus auf die Potentiale der gebäudetechnischen Anlagen zu legen. Um eine vereinfachte und dennoch realitätsnahe Betrachtung durchführen zu können, wird eine büroähnliche Gebäudenutzung betrachtet. Die Norm-Innentemperatur im Winter wird auf 21,0 – 23,0 °C (genormter Wert für Einzel- und Großraumbüros, Klasse der Qualität der operativen Raumlufttemperatur A) festgelegt [110]. In den Sommermonaten wird die operative Raumlufttemperatur auf maximal 26 °C begrenzt [111].

Tabelle 7.2 fasst die Randbedingungen an die Raumnutzung und die operative Raumlufttemperatur zusammen.

Tabelle 7.2: Randbedingungen der Gebäudenutzung

Randbedingung	Dimension
operative Raumlufttemperatur	Winter: 21,0 - 23,0 °C Sommer: < 26,0 °C
Präsenzzeiten	Montag - Freitag 07.00 - 18.00 Uhr

7.1.3 Gebäudetechnische Randbedingungen und Regelung der Anlagentechnik

Die Anlage zum Betrieb des Gebäudes besteht aus zwei sensiblen Thermischer Energiespeicher (TES). Ein warmer TES, der durch Vakuumröhrenkollektoren beladen wird, versorgt die Fußbodenheizung im Heizbetrieb. Die Deckenkühlung wird durch einen kalten sensiblen TES gespeist. Mithilfe eines nicht verglasten Solarabsorbers wird Wärme an die Umgebung (Temperaturunterschied zwischen Außenraum und Kollektor) sowie an den Horizont (thermische Abstrahlung von Wärme) abgegeben und der Tank auf eine niedrige Temperatur abgekühlt (vgl. hierzu das Prinzip des Radiative Cooling in Kapitel 4.4.3).

Abbildung 7.2 verdeutlicht schematisch die Anlagentechnik. Zusätzlich werden die Parameter der einzelnen Elemente dargestellt.

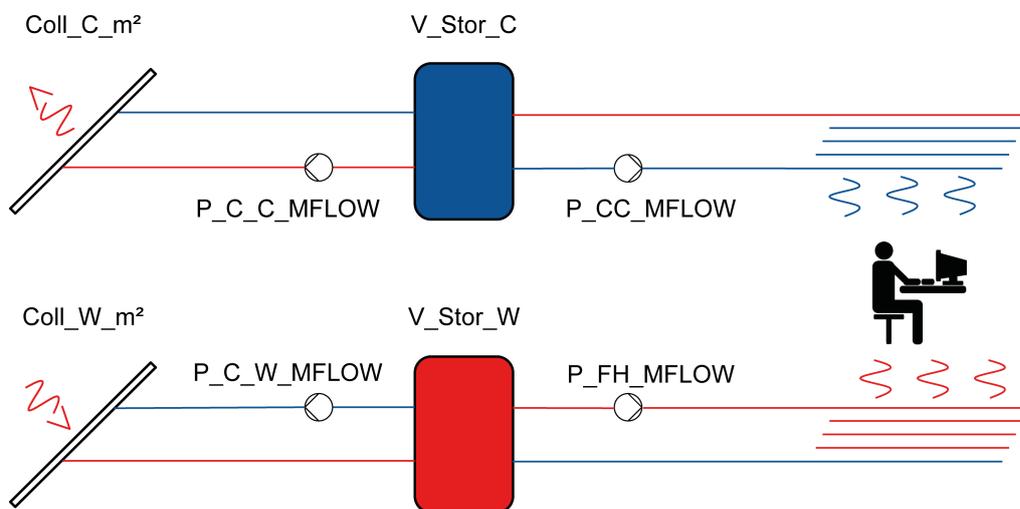


Abbildung 7.2: Schematische Darstellung der Anlagentechnik und der gesetzten Parameter

Die Anlage unterteilt sich somit in vier Regelkreise, die jeweils mit einer Pumpe ausgestattet sind. Diese werden mithilfe eines Zweipunktreglers gesteuert. Nachfolgend werden die Regelkreise aufgelistet. Die Abkürzungen in den Klammern werden einheitlich im Rahmen dieser Betrachtung verwendet und ermöglichen eine eindeutige Zuordnung zu Regelkreis und Pumpe.

- Kollektorkreis warm (C_W $\hat{=}$ Collector Warm)

7.1 Modelldefinition und Implementierung in ein Gebäudesimulationsprogramm

- Kollektorkreis kalt (C_C $\hat{=}$ Collector Cold)
- Regelkreis Fußbodenheizung (FH $\hat{=}$ Floor Heating)
- Regelkreis Deckenkühlung (CC $\hat{=}$ Ceiling Cooling)

Der Kollektorkreis C_W wird in Abhängigkeit der gesamten solaren Einstrahlung (diffuse und direkte Strahlung) gesteuert. Steigt die Einstrahlung auf den nach Süden ausgerichteten Vakuumröhrenkollektor Coll_W_m² (Neigung 45°) über 100 W/m² erhält die Pumpe P_C_W_MFLOW des Kollektorkreises C_W ein Signal und wird angeschaltet. Somit heizt sich der sensible TES kontinuierlich auf. Diese Regelung wird jedoch nur so lange ausgeführt, bis die Temperatur am Auslass des Kollektors über der Durchschnittstemperatur des Speichers liegt. Damit soll vermieden werden, dass der Speicher Wärme über die Kollektoren verliert und aktiv herunter gekühlt wird.

Die Pumpe P_C_C_MFLOW des Kollektorkreises C_C wird hingegen erst in Betrieb genommen, sobald die Einstrahlung auf der Absorberfläche Coll_C_m² auf 0 W/m² fällt (horizontale Ausrichtung) und die Umgebungstemperatur unter der durchschnittlichen Temperatur des kalten sensiblen TES liegt. Somit wird vermieden, dass die Pumpe in warmen Sommernächten den Speicher aufheizt, und es kann Wärme an die Umgebung bzw. den Himmel abgestrahlt werden. Solange die Ausgangstemperatur der Absorbers unter der durchschnittlichen Tanktemperatur ist, bleibt die Pumpe in Betrieb.

Im Wesentlichen werden zum behaglichen Betrieb des Gebäudes drei Betriebszustände unterschieden: (1) das Gebäude wird über die Fußbodenheizung geheizt, (2) dem Gebäude wird über die Deckenkühlung Wärme entzogen, (3) es ist weder eine Beheizung noch eine Kühlung des Gebäudes notwendig. Die Anlage ist dabei so gesteuert, dass ein zeitgleicher Heiz- und Kühlbetrieb über die Pumpen P_FH_MFLOW und P_CC_MFLOW ausgeschlossen wird.

Unter diesen Voraussetzungen wird die Regelung des Gebäudes anhand der Außentemperatur durchgeführt. Fällt die gemittelte Außentemperatur der letzten 24 Stunden unter 15 °C, wird die Beheizung des Gebäudes freigegeben. Steigt hingegen die Außentemperatur über 15 °C, wird die Kühlung des Gebäudes freigegeben.

Außerdem wird das Heizen erst freigegeben, sobald die Raumtemperatur unter 20 °C fällt und die Temperatur am Auslass des sensiblen TES über 25 °C liegt. Die Kühlung unterliegt zusätzlich der Regelung, dass die Temperatur am Auslass des sensiblen TES unterhalb der Raumtemperatur liegt. Zusätzlich wird die Kühlung erst in Betrieb genommen, sobald die Raumtemperatur über 26 °C steigt und abgeschaltet, sobald die Raumtemperatur unter 21 °C fällt.

Um die Aufheizung des Raumes durch Solarstrahlung zu vermeiden, wird ein außenliegender Sonnenschutz installiert, der ab einer Einstrahlung von 200 W/m² auf der Außenfläche des Fensters aktiviert wird. Sobald diese Grenze überschritten wird, wird der Sonnenschutz zu 75 % geschlossen. Um gleichzeitig eine Überhitzung des Raumes kostengünstig und klimaneutral zu vermeiden, wird eine automatisierte Fensterlüftung realisiert. Diese ist so geregelt, dass ab

7 Beschreibung des Simulationsmodells und des methodischen Vorgehens

einer Innenraumtemperatur von $> 20\text{ °C}$ und einer gleichzeitigen Außentemperatur zwischen 10 °C und 24 °C die Fenster geöffnet werden. Sobald die Fenster geöffnet sind, werden der Heiz- bzw. Kühlbetrieb unterbrochen.

Um den Behaglichkeitsanforderungen des Innenraums gerecht zu werden, werden Vorlauftemperaturen der Fußbodenheizung von maximal 35 °C zugelassen [112]. Sollten die Vorlauftemperaturen der Fußbodenheizung über 35 °C liegen, wird mithilfe einer Bypassregelung der Heizungsvorlauf durch den Heizungsrücklauf abgekühlt.

Um die Anlage effizient zu betreiben, werden große Temperaturspreizungen zwischen Vor- und Rücklauf der Fußbodenheizung vermieden. Je niedriger die Temperaturdifferenz zwischen Vor- und Rücklauf, desto höher muss der Massenstrom zur Erlangung der geforderten operativen Raumtemperatur sein. Dieser Zusammenhang kann aus Formel 4.1 abgeleitet werden.

7.2 Darstellung der Variablen

Variablen werden in abhängige und unabhängige Variablen unterteilt. Dabei sind unabhängige Variablen stets feste Größen. Abhängige Variablen hingegen sind die entsprechenden Mess- bzw. Zielwerte der Betrachtung. Durch Manipulation unabhängiger Variablen (in diesem Fall die gesetzten Parameter im Simulationsmodell) kann der direkte Einfluss auf die abhängigen Variablen (Anzahl der Stunden pro Jahr innerhalb des Behaglichkeitsbandes) dargestellt werden.

7.2.1 Unabhängige Variablen

Der Begriff „unabhängige Variable“ beschreibt die Einflüsse, die durch den Versuchsleiter manipuliert werden können [113]. In diesem Fall stellt das Einzonenmodell, das Modell mit seinen physikalischen Eigenschaften, eine unabhängige Variable dar. Nachfolgend werden die unabhängigen Variablen aufgelistet.

- Einzonenmodell mit entsprechenden physikalischen Eigenschaften
- Verschattungskonzept
- Regelungskonzept der gebäudetechnischen Anlagen
- Klima am Referenzstandort
- Kollektorfläche Coll_W_m^2
- Absorberfläche Coll_C_m^2
- Volumen des warmen und kalten sensiblen TES: V_Stor_W , V_Stor_C
- Massenströme der installierten Pumpen: $P_C_W_MFLOW$, $P_C_C_MFLOW$, P_FH_MFLOW , P_CC_MFLOW

- Spreiztemperaturen (Ober- und Untergrenzen) der Regelstrategie

In nachfolgender Tabelle sind die Parameter detailliert aufgelistet sowie die Ausgangswerte entsprechend dem Stand der Technik dargestellt. In dieser Tabelle werden bereits die gewählten Intervalle für das spätere Optimierungsverfahren eingeführt. Die Intervallgrenzen sind frei gewählt.

Tabelle 7.3: Intervallbereiche der Parameter

Parameter	Beschreibung	Intervall	Ausgangswert
V_STOR_W	sensibler thermischer Speicher (warm)	0,1 - 10 m ³	1 m ³
V_STOR_C	sensibler thermischer Speicher (kalt)	0,1 - 10 m ³	1 m ³
Coll_W_m2	Kollektorfläche	0,1 - 10 m ²	5 m ²
Coll_C_m2	Absorberfläche	0,1 - 10 m ²	5 m ²
P_C_W_MFLOW	Massenstrom Pumpe Kollektor	50 - 500 kg/h	500 kg/h
P_C_C_MFLOW	Massenstrom Pumpe Absorber	50 - 500 kg/h	300 kg/h
P_FH_MFLOW	Massenstrom Fußbodenheizung	50 - 500 kg/h	100 kg/h
P_CC_MFLOW	Massenstrom Deckenkühlung	50 - 500 kg/h	100 kg/h

7.2.2 Abhängige Variablen

Der „[...] Einfluss auf das zu beobachtende Phänomen [...]“ [113] wird als „abhängige Variable“ bezeichnet. D.h. die abhängigen Variablen werden unter Einfluss der unabhängigen Variablen untersucht. In diesem Modellaufbau wird die Anzahl der Stunden pro Jahr innerhalb der Behaglichkeitsbandes als abhängige Variable bezeichnet (vgl. hierzu Abbildung 7.3). Die abhängige Variable in dieser Untersuchung ist:

- Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes

7 Beschreibung des Simulationsmodells und des methodischen Vorgehens

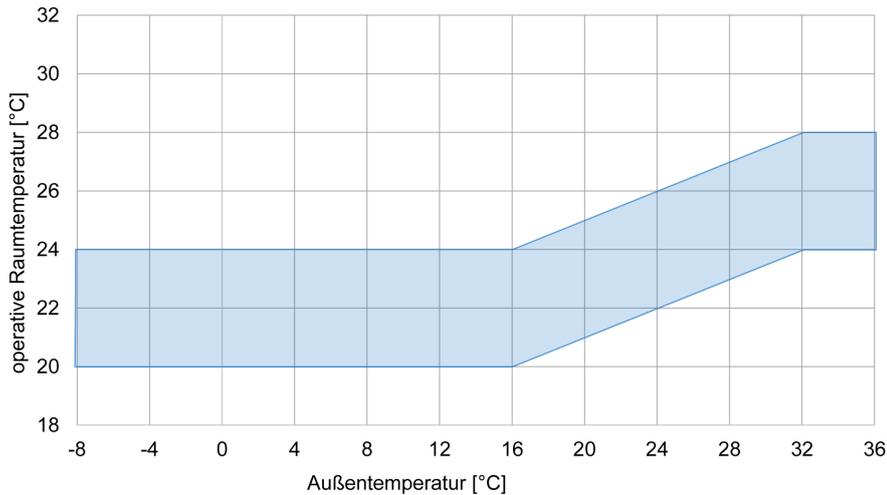


Abbildung 7.3: Darstellung des Behaglichkeitsbands in Abhängigkeit der Außentemperatur nach [114]

7.3 Sensitivitätsanalyse (SA)

„Voraussetzung für eine sinnvolle Analyse [...] ist ein umfangreiches Verständnis von dem Einfluss der Varianz der Eingangsvariablen x auf die Varianz der betrachteten Ausgangsgrößen y .“ [115]

Die Unsicherheit des Outputs einer Simulation kann mithilfe einer SA den Unsicherheiten des Inputs zugeteilt werden [116]. Auf diese Weise werden die Inputs definiert, die den größten Einfluss auf den Output haben. Studien zeigen, dass mithilfe eines dynamischen Gebäudemodells in Kombination mit SAs die relevante Gewichtung der Parameter identifiziert werden kann und somit die einflussreichsten Parameter ermittelt werden können. Neben einer lokalen SA, die den Einfluss von kleinen Input-Änderungen auf den Output beschäftigt, werden seit den späten 1980er Jahren sog. globale SA betrachtet, die mehrere Inputs in einem weiter definierten Bereich betrachten [116] [117]. Die Zielsetzung der Aufgabenstellung sollte klar definiert sein, bevor SAs durchgeführt werden. Hierzu zählen (nach [117] und [118]):

- Identifikation und Priorisierung der einflussreichsten Inputs
- Identifikation von Inputs, die keinen Einfluss auf den Output haben, um ihnen vorgegebene Sollwerte (Fixwerte) zuzuteilen, um somit die Anzahl der Parameter sowie die Rechenzeit zu reduzieren
- falls nötig, visuelle Darstellung des Output-Verhaltens in Abhängigkeit der Inputs
- Kalibrierung einzelner Inputs durch reale Output-Beobachtungen bzw. definierte Randbedingungen

Mithilfe der lokalen SA wird der Einfluss einzelner Parameter auf den Output eines energetischen Gebäudemodells ermittelt. Hierzu werden alle weiteren Parameter konstant gehalten

und abwechselnd die einzelnen Parameter variiert sowie deren Einfluss auf das Ergebnis betrachtet (sog. one-step-at-a-time Methode (OAT)-Methode). Dabei spielt die Abweichung von der Ausgangssituation eine wesentliche Rolle. Nach erfolgreichem Abschluss der Durchgänge werden die einflussreichsten Parameter hierarchisch geordnet (*Screening*). *Screening*-Methoden eignen sich gut für große, rechenintensive Gebäudesimulationen oder Betrachtungen mit einer großen Anzahl an Parametern, wie sie in nachhaltigen Gebäuden und Technikkonzepten vorherrschen [119]. Lokale SA haben den Nachteil, dass sie keine Korrelation zwischen den Input-Werten aufzeigen können [117].

Studien zeigen, dass das Durchführen einer lokalen SA vor einer globalen SA durchaus sinnvoll sein kann, da die Anzahl der einflussreichen, zu betrachtenden Parameter reduziert werden kann. Parameter, die einen geringen bis keinen Einfluss auf das Ergebnis haben, werden nicht weiter betrachtet [119] [120] [121] [122].

Im Anschluss durchgeführte globale SA betrachten, im Gegensatz zu lokalen SA, den gesamten möglichen Parameterbereich. Die Anzahl der Parameter sowie ihre mögliche Wertigkeit spannt somit einen deutlich größeren Zielbereich auf. Mit steigender Anzahl an Parametern und einer daraus folgenden steigenden Anzahl an möglichen Lösungen nimmt die Komplexität und der benötigte Rechenaufwand deutlich zu.

In dieser Untersuchung wird eine SA anhand eines Parameterscreenings durchgeführt. Ziel ist es durch Variation eines Eingangsparameters den Einfluss auf den Output zu ermitteln. Neben dem Parameterscreening gibt es noch Faktor-Priorisierung, Varianz-Vermeidung und Faktor-Verhalten. Die Wahl der Methodik richtet sich nach der Fragestellung der durchzuführenden SA. [118] [106]

Kristensen und Petersen untersuchen in ihrer Studie drei lokale Arten der SA: Lokal, Morris und Sobol. Sie empfehlen beim Entwurf eines neuen Gebäudes die Methode nach Morris heranzuziehen. Ihre Wahl wird begründet durch einen geringeren Rechenaufwand im Vergleich zu den beiden anderen betrachteten Methoden. Zudem wird sie empfohlen, wenn die Variation der Eingangsparameter gleichmäßig auf ausgewählte Grenzen verteilt ist. Dies bedeutet konstante Intervallschritte bei der Eingabe der Eingangsparameter. [123]

Die Morris-Methode findet in zahlreichen Untersuchungen Anwendung, die den Fokus auf eine energetische Gebäudeanalyse setzen [124] [125] [126] [127] [128]. Eine Studie die hervorgehoben werden soll, ist von Corrado und Mechri aus dem Jahr 2009. Die Autoren führen eine Energiebewertung eines Wohngebäudes in Turin, Italien durch. Es werden 129 Inputs identifiziert, die in drei Gruppen unterteilt sind: Klimadaten, Daten der Gebäudehülle und Nutzungsdaten. Mithilfe der Morris-Methode werden die einflussreichsten Parameter auf die Wärmebilanz des Gebäudes identifiziert. Das Resultat zeigt, dass lediglich zehn von 129 Inputs einen signifikanten Einfluss auf die Energiebewertung von Gebäuden haben. Hierzu zählen im Wesentlichen die Kühlung der operativen Raumtemperatur, die Luftwechselrate, die Anzahl der Gebäudenutzer, die Stoffwechselrate sowie die Wärmeabgabe der technischen Installationen. [129]

7.3.1 Screening nach Morris

Mithilfe der *Screening*-Methode werden die Einflüsse der Parameter auf das Ergebnis entsprechend ihrer Wertigkeit aufgelistet. Dies zeigt deutlich den größten Einflussparameter auf. Nachteil dieser Variante ist, dass lediglich ein Parameter geändert wird und somit nur der Einfluss dieses einen Parameters messbar ist. Dadurch lassen sich signifikante von nicht signifikanten Parametern unterscheiden [115].

Um zu zeigen, dass die Anlagentechnik trotz geringer Abweichungen der einzelnen Komponenten zuverlässig funktioniert, werden im Folgenden die Eingangsdaten der Simulation sukzessive um ein vordefiniertes Intervall geändert und die Ergebnisse miteinander verglichen. Somit lassen sich die Einflussparameter nach ihrer Gewichtung bestimmen, die zu einem robusten Betrieb der Anlagentechnik notwendig sind.

Mithilfe von Scatterplots lässt sich der Einfluss eines Input-Parameters auf das Ergebnis (den Output) gut darstellen. Scatterplots bieten hier eine gute Ausgangssituation, um den Zusammenhang zwischen Input und Output zu visualisieren [130]. Dabei wird auf der x-Achse der streuende Input-Parameter dem Output auf der y-Achse gegenübergestellt. Beispiele für Scatterplots können den Abbildungen 7.5 und Abbildung 7.6 entnommen werden.

Unter der Morris-Methode wird eine globale SA nach der sog. OAT verstanden. Hierbei wird lediglich ein Parameter ausgewählt, in festen Schrittweiten variiert und anschließend der Output betrachtet. Sobald die Betrachtung des ersten Parameters abgeschlossen ist, wird ein weiterer Parameter betrachtet. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis alle relevanten Parameter betrachtet wurden. Die Standardabweichungen der einzelnen Parameter werden über die Mittelwerte des Outputs je Parameter dargestellt. [59]

Hierbei handelt es sich um eine leicht verständliche und leicht durchführbare SA. Durch die Darstellung der Ergebnisse in Abhängigkeit ihrer Standardabweichung können Parameter mit großem Einfluss auf den Output schnell ermittelt werden.

7.4 Einbindung der Optimierung

Die Optimierungsverfahren werden mithilfe des externen Optimierungstools GenOpt angewandt, welches an die Simulationssoftware TRNSYS gekoppelt wird. Somit ist es möglich, lokale sowie globale ein und mehrdimensionale Optimierungsalgorithmen zu untersuchen [62]. Der Ablauf und das Zusammenspiel der Software kann der Abbildung 4.10 entnommen werden. Um die Fragestellungen betrachten zu können, wird eine geeignete Zielfunktion definiert, mit der das Ergebnis innerhalb des Lösungsraums gesucht werden kann.

7.4.1 Cost Function Optimization – Zielfunktion des Optimierung

Im Rahmen dieser Untersuchung wird das Behaglichkeitsband der DIN EN 15251 (vgl. Abbildung 7.3) als Zielfunktion gewählt [114]. Da gezeigt wurde, dass es bei der Anwendung mehrerer Zielfunktionen zu Konflikten kommen kann, wird an dieser Stelle nur eine aussagekräftige Zielfunktion in Abhängigkeit der Zeit definiert (vgl. hierzu Kapitel 6). Bedingung hierbei ist das Erreichen der operativen Raumtemperatur innerhalb des vorgegebenen Komfortbereichs.

Bei einer Außentemperatur unter 16 °C wird eine Komfortinnentemperatur Θ_{Ra} von 22 °C (+/- 2 K) angestrebt. Steigt die Außentemperatur über 32 °C, erhöht sich die Anforderung der Komfortinnentemperatur auf 26 °C (+/- 2 K). Im Übergangsbereich wird die Komfortinnentemperatur nach folgender Gleichung definiert. [114]

$$\Theta_{Ra,C} = 18^{\circ}C + 0,25 * \Delta T \quad (7.1)$$

Die Problemstellung mit dem Ziel $\min f(x)$ wird betrachtet, wobei $f(x)$ die Zielfunktion darstellt. Alle stündlich ermittelten Ergebnisse der Simulationen (Innenraumtemperatur des Untersuchungsgegenstands) müssen innerhalb des definierten Bereiches liegen, um die vorgegebene Zielfunktion erfüllen zu können. Nachfolgende Formel verdeutlicht die Zielfunktion. T_{out} und T_{in} entsprechen der Außen- bzw. Innenraumtemperatur und θ_{high} sowie θ_{low} der oberen bzw. unteren Temperaturgrenze des Behaglichkeitsbandes.

$$\begin{aligned} \min f(x) = & \\ & ((lt(T_{out}, 16) * and(le(T_{in}, 24), ge((T_{in}, 20)))) \\ & + (and(ge(T_{out}, 16), le(T_{out}, 32)) \\ & * and(ge((T_{in}, \theta_{low}), le((T_{in}, \theta_{high})))) \\ & + (gt(T_{out}, 32) * and(le((T_{in}, 28), ge((T_{in}, 24)))) * (-1) \end{aligned} \quad (7.2)$$

Ziel ist es, die Anlagentechnik so zu optimieren, dass die operative Raumtemperatur des Untersuchungsgegenstands in dem blau markierten Bereich aus Abbildung 7.3 gelangt. Stündliche Messwerte werden hierzu aus der Simulationsumgebung graphisch dargestellt.

Der Einsatz von Optimierungsverfahren und die aufgestellte Zielfunktion verfolgen das Ziel, alle stündlich ermittelten Werte innerhalb des Behaglichkeitsbandes zu bringen. Das globale Optimum hierbei beträgt 8760 Stunden des Jahres innerhalb des definierten Bereichs.

7.5 Ausgangssituation

Die beschriebene Anlagentechnik sowie der Untersuchungsgegenstand werden in ein thermisch-energetisches Gebäudemodell übertragen und als Ausgangssituation herange-

7 Beschreibung des Simulationsmodells und des methodischen Vorgehens

zogen. Um vorab die einflussreichsten Parameter zu identifizieren wird eine OAT nach Morris durchgeführt. Die folgenden Unterkapitel gehen auf SA allgemein und auf die *Screening-Methode* nach Morris im Detail ein. Darüber hinaus wird anhand der Ausgangssituation die Methodik für die definierten Parameter angewandt.

Abbildung 7.4 zeigt die Simulationsergebnisse anhand des Behaglichkeitsbandes bei einer Dimensionierung der Anlagentechnik nach anerkannten Regeln der Technik. Es ist gut erkennbar, dass sich ein Großteil der stündlich ermittelten Ergebnisse außerhalb des Behaglichkeitsbandes befindet. Bei Außentemperaturen unter 8 °C ist es nicht möglich, die Innenraumtemperatur konstant über 20 °C zu halten. Zu diesen Zeiten kann nicht ausreichend Wärme über die Fußbodenheizung dem Raum zugeführt werden. Darüber hinaus ist bei einer Außentemperatur von > 5 °C gut die Fensterlüftung erkennbar. Dies ist ersichtlich an dem Einbruch der Innenraumtemperaturen über dem Behaglichkeitsband bei einer Außentemperatur von 5 °C. Ohne Fensterlüftung befänden sich die ermittelten Stundenwerte ab einer Außentemperatur mehrheitlich über dem Behaglichkeitsband.

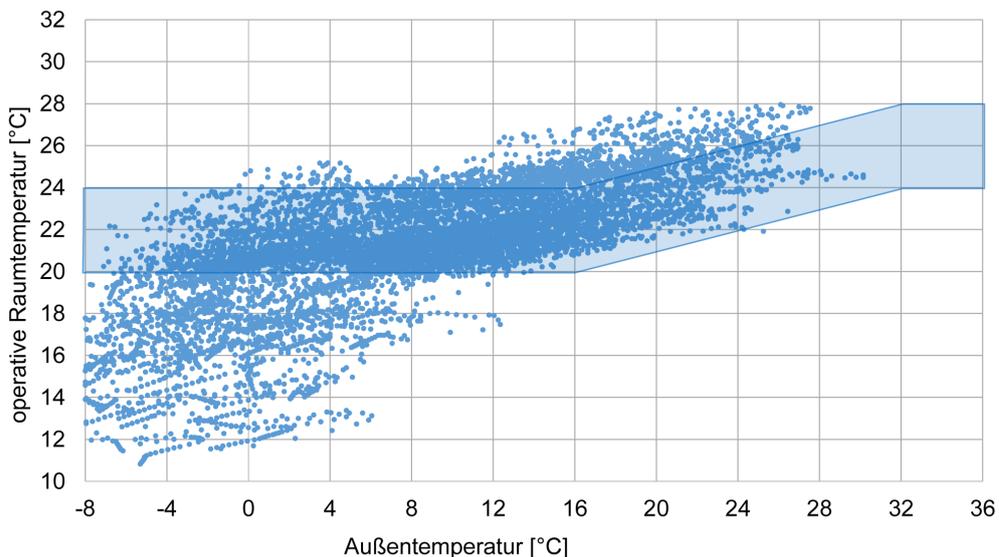


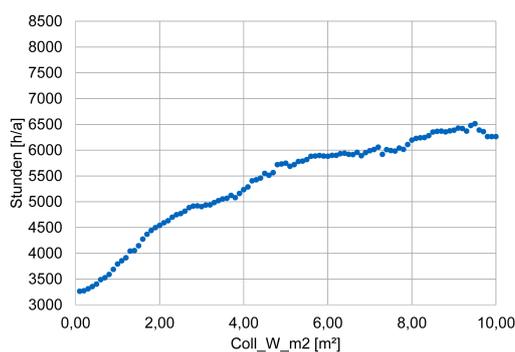
Abbildung 7.4: Darstellung der Ausgangssituation nach Dimensionierung der Anlagentechnik nach anerkannten Regeln der Technik

7.5.1 Anwendung des Screening-Methode nach Morris an der Ausgangssituation

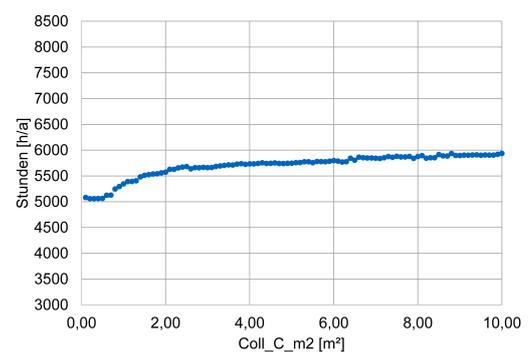
In einem ersten Schritt wird der Einfluss jedes einzelnen Parameters auf den Output betrachtet. Hierzu wird die Simulation über alle Berechnungsschritte konstant gehalten und lediglich ein Parameter genauer betrachtet. Abbildung 7.5 zeigt den Einfluss durch Variation von vier Parametern (Volumen des warmen sensiblen-thermischen Speichers, Volumen des kalten sensiblen-thermischen Speichers, Kollektorfläche und Absorberfläche) auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Es ist gut erkennbar, dass durch Variation der

Parameter (x-Achse) eine Änderung des Outputs (y-Achse) stattfindet. Am stärksten beeinflusst die Änderung der Kollektorfläche den Output der Simulation (vgl. Abbildung 7.5 (a)). Mit steigender Kollektorfläche kann eine höhere Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes erreicht werden. Der Verlauf der Resultate scheint sich einem Wert anzunähern. Dies bedeutet, dass ab einem bestimmten Punkt eine größere Kollektorfläche keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Ergebnisse der Simulation hat. Die Absorberfläche zeigt bei steigender Fläche ebenfalls einen Anstieg des Simulationsoutputs, jedoch ist der Verlauf der Resultate flacher als bei der Kollektorfläche (7.5 (b)). Auch hier ist davon auszugehen, dass ab einer bestimmten Absorberfläche kein signifikanter Einfluss auf die Resultate zu erwarten ist.

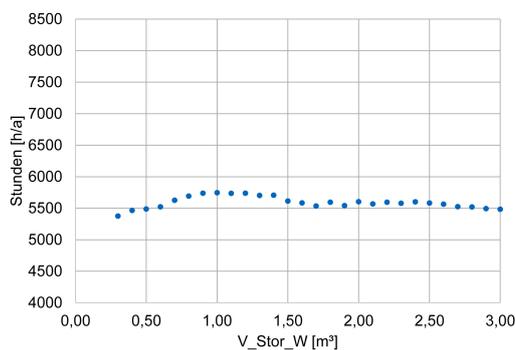
Die Volumina der thermischen Speicher haben durch Variation im Vergleich zu den Kollektor- und Absorberflächen einen geringen Einfluss auf die Outputs (7.5 (c) und (d)). Das Speichervolumen des warmen thermischen Speichers erreicht bereits bei einem Tankvolumen von $1,0\text{ m}^3$ einen Maximalwert. Mit steigendem Volumen des warmen thermischen Speichers kann keine Erhöhung der Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes realisiert werden. Der Verlauf der Resultate des kalten thermischen Speichervolumens weist einen nahezu konstanten Verlauf über die Variation des Inputs auf. Tankvolumina $> 0,3\text{ m}^3$ führen zu keinem besseren Simulationsoutput.



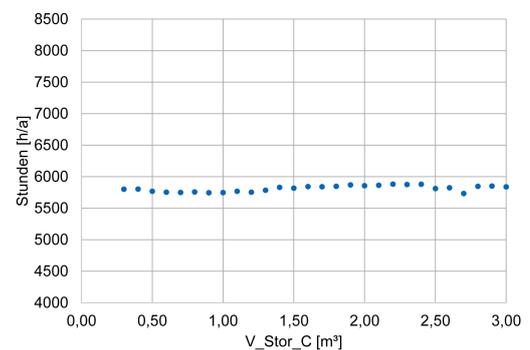
(a) Kollektorfläche



(b) Absorberfläche



(c) thermisches Speichervolumen warm

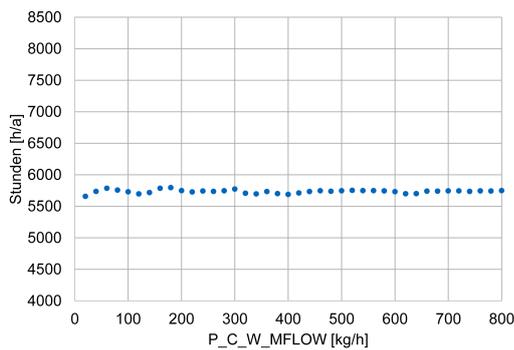


(d) thermisches Speichervolumen kalt

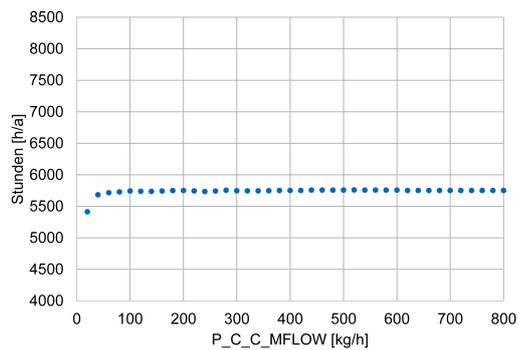
Abbildung 7.5: Einfluss variierender Parameter auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes (1)

7 Beschreibung des Simulationsmodells und des methodischen Vorgehens

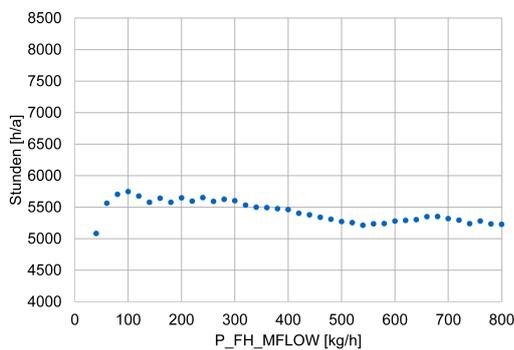
Abbildung 7.6 zeigt den Einfluss der Pumpen auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes im Rahmen des Simulationsmodells. Die dargestellten Massenströme zeigen, dass lediglich die Pumpe der Fußbodenheizung einen erheblichen Einfluss auf den Output hat (vgl. Abbildung 7.6 (c)). Bei allen betrachteten Pumpen können bereits bei einem niedrigen Massenstrom akzeptable Resultate generiert werden. Bei steigendem Massenstrom der Pumpe des Parameters P_FH_MFLOW (Pumpe der Fußbodenheizung) werden die Ergebnisse und somit die Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes niedriger. Das System ist bei hohen Massenströmen der Fußbodenheizung nicht mehr in der Lage, die transportierte Wärme an den Raum abzugeben.



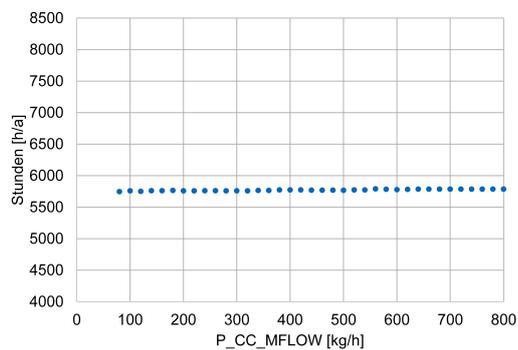
(a) Pumpe Kollektor



(b) Pumpe Absorber



(c) Pumpe Fußbodenheizung



(d) Pumpe Deckenkühlung

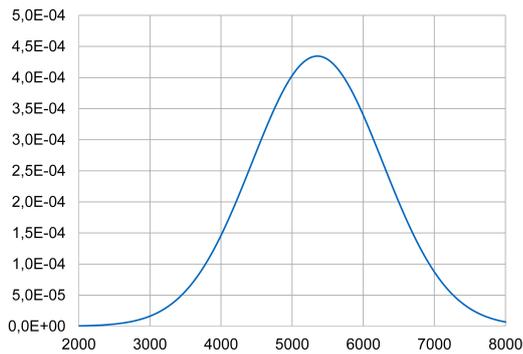
Abbildung 7.6: Einfluss variierender Parameter auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes (2)

Um nun nach Morris vorzugehen, wird die Standardabweichung jedes einzelnen Parameters ermittelt. Abbildung 7.7 zeigt eine Gegenüberstellung aller betrachteten Parameter und deren empirische Standardabweichung. Diese zeigt das Streumaß aller durchgeführten Simulationen um den Mittelwert jedes einzelnen Parameters. Je breiter die Kurve der Standardabweichung ist, desto größer weicht der Output durch Variation des Parameters vom Mittelwert ab. Da die Variation der Kollektorfläche den größten Einfluss auf die Outputs der Simulation vorweist, ist die Standardabweichung dieses Parameters am größten. Abbildung 7.5 (a) und Abbildung 7.7 (a) verdeutlichen diesen Zusammenhang. Ist der Einfluss eines variierten Parameters auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes eher gering, so ist ihre

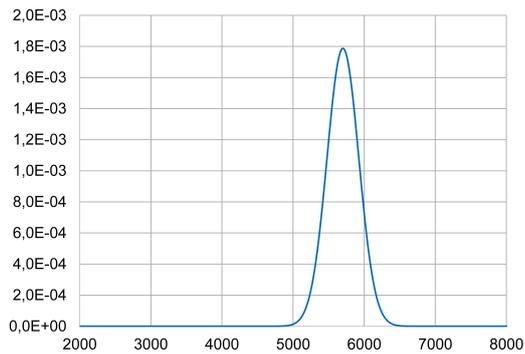
Standardabweichung ebenfalls gering (vgl. Parameter P_CC_MFLOW in Abbildung 7.6 (d) und Abbildung 7.7 (h)).

Nach dieser Betrachtung können die Parameter Kollektor- und Absorberfläche als einflussreichste Parameter identifiziert werden. Mit Ausnahme der Pumpe für die Fußbodenheizung können die Pumpen des Systems nur einen geringen bis keinen signifikanten Einfluss auf den Simulationsoutput vorweisen. Die thermischen Speichervolumen weisen eine mittlere Standardabweichung auf, liefern jedoch bereits bei geringen Volumina gute Resultate.

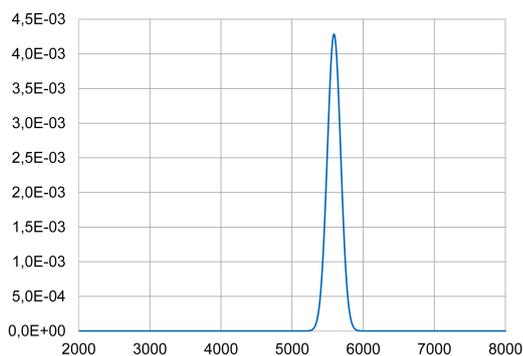
7 Beschreibung des Simulationsmodells und des methodischen Vorgehens



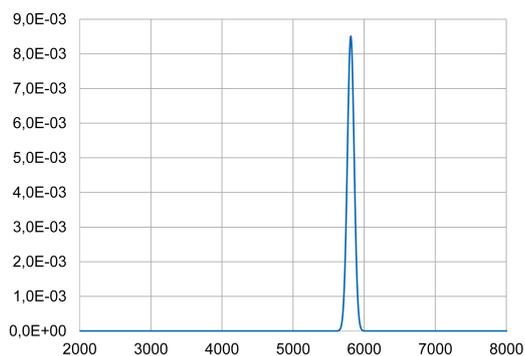
(a) Kollektorfläche



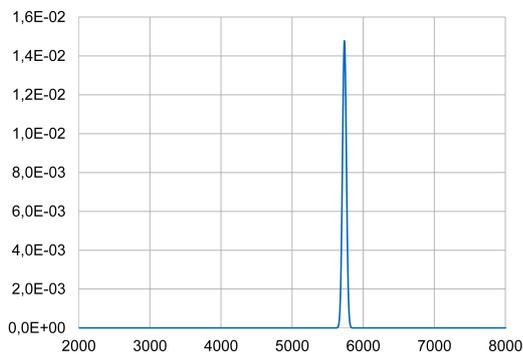
(b) Absorberfläche



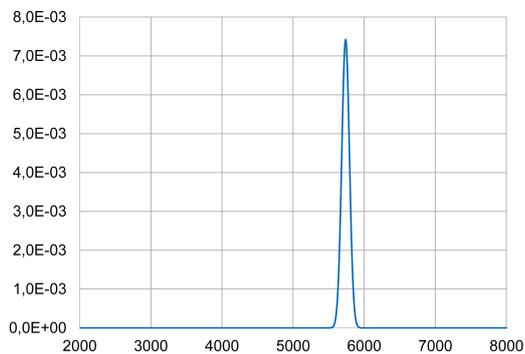
(c) thermisches Speichervolumen warm



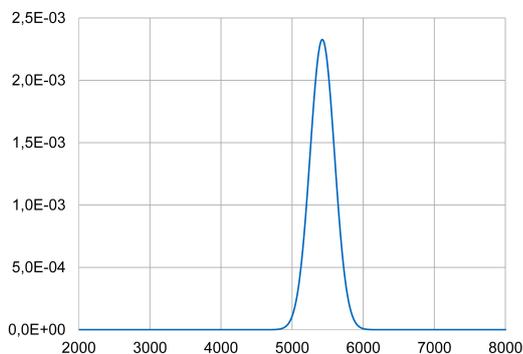
(d) thermisches Speichervolumen kalt



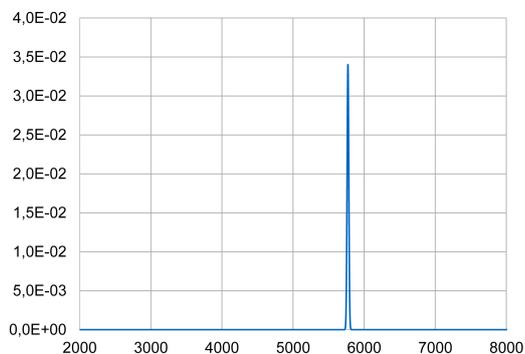
(e) Pumpe Kollektor



(f) Pumpe Absorber



(g) Pumpe Fußbodenheizung



(h) Pumpe Deckenkühlung

Abbildung 7.7: Gegenüberstellung der Standardabweichungen der betrachteten Parameter

Bei der SA nach Morris wird abschließend die Standardabweichung über den empirischen Mittelwerten der einzelnen Parameter dargestellt. Abbildung 7.8 verdeutlicht dieses Vorgehen. Aus dieser Darstellung lässt sich entnehmen, dass der Parameter Coll_W_m2 eine hohe Standardabweichung bei einem gleichzeitig niedrigen Mittelwert vorweist. Der Einfluss dieses Parameters auf den Output ist bei Variation des Eingangswertes demnach hoch. Darüber hinaus wird an dieser Stelle deutlich, dass obwohl die Parameter der Kollektor- und Absorberfläche als einflussreichste Parameter identifiziert wurden, ein erheblicher Unterschied zwischen diesen beiden Parametern liegt.

Die restlichen Parameter weisen eine geringe Standardabweichung auf. Parameter, die sich im rechten unteren Bereich der Abbildung befinden (niedrige Standardabweichung, hoher Mittelwert), haben bei Streuung des Parameters geringeren bis keinen signifikanten Einfluss auf den Output im Vergleich zu Parameter, die sich im linken oberen Bereich der Darstellung befinden. Im Idealfall befinden sich alle Parameter im rechten unteren Bereich der Darstellung. Somit würden sie einen hohen Mittelwert und eine niedrige Standardabweichung vorweisen. Bei Variation eines Parameters ist der Einfluss auf das Ergebnis in diesem Fall gering.

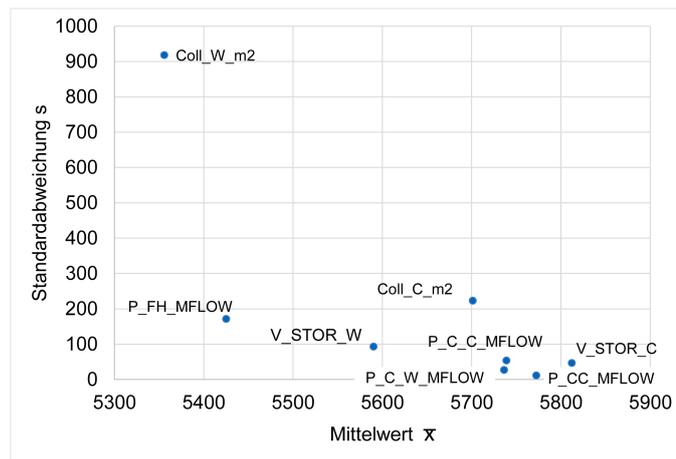


Abbildung 7.8: Screening der Ausgangssituation nach Morris

7.6 Energetische Gebäude- und Anlagenoptimierung

Eine gebäudetechnische Anlage gewährleistet im Idealfall, dass für jede mögliche Außentemperatur ein behagliches Innenraumklima erzeugt werden kann [131]. Um dies umzusetzen, wird eine quantitative Untersuchungsmethode mit abhängigen und unabhängigen Variablen herangezogen und anhand eines Referenzraums und eines Referenzklimas betrachtet.

Die Dimensionierung und Auslegung von Heizungs- und Kühlanlagen erfolgt über genormte Außentemperaturwerte, die einen Extremwert darstellen. Meist treten diese Extremtemperaturen unregelmäßig und sporadisch auf, was zu einer Überdimensionierung von gebäudetechnischen Anlagen führt. Um dem entgegenzuwirken, werden Jahressimulationen herangezogen, die den dynamischen Verlauf der Energieströme am Gebäude darstellen. Ein weiterer Schritt,

um eine Überdimensionierung zu vermeiden, liegt in der Optimierung der Bauphysik und den anlagentechnischen Installationen. Zur Darstellung und Umsetzung der Optimierung wird die Freeware GenOpt verwendet [132]. Hierbei handelt es sich um eine Optimierungssoftware, die mithilfe der CFO in Abhängigkeit eines gewählten Optimierungsalgorithmus ein globales Minimum sucht (vgl. Kapitel 5). Hierfür greift die Software auf die Input-Files der Anlagensimulation zu, ändert die Eingangsparameter und vergleicht den Output der Simulationen untereinander.

7.7 Ablauf der Optimierungssimulation

Das Anlagenkonzept wird – aufbauend auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Kapitel – in die Simulationssoftware TRNSYS eingepflegt. Hierfür werden die Wetterdaten des Standorts München sowie die Gebäudedaten in das Simulationstool übertragen. Innerhalb des *Simulation Studios* wird die Zielfunktion nach Kapitel 7.4.1 definiert und die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes nach jeder Simulation in einer externen Datei abgespeichert.

Innerhalb des *Simulation Studios* werden die untersuchten Parameter eingepflegt. Diese können über die *Simulation Cards* direkt variiert werden. Parallel werden die einzelnen Variablen in einer Input-Datei abgelegt.

GenOpt greift auf die Variablen in der Input-Datei zu, gibt ihnen einen Wert dessen Intervall vorab in GenOpt definiert wurde und startet die Simulation in TRNSYS. Dabei versucht GenOpt, die vorgegebene Zielfunktion möglichst genau zu erreichen. Ist die Zielvorgabe nicht erreicht, variiert GenOpt eine Variable und startet die Simulation neu. Mit welcher Methode das Optimierungstool nach einer Annäherung der Zielfunktion sucht, hängt von der Wahl des Optimierungsalgorithmus ab.

Sobald die Zielvorgabe erreicht ist oder keine weitere Annäherung erreicht werden kann, beendet GenOpt die Optimierungssimulation. Die Werte der Variablen werden ausgegeben und können zur Auswertung und Visualisierung der Ergebnisse in TRNSYS übertragen werden. Dabei sollte stets ein Plausibilitätscheck der Daten erfolgen. Abbildung 7.9 stellt den prinzipiellen Programmablauf dar.

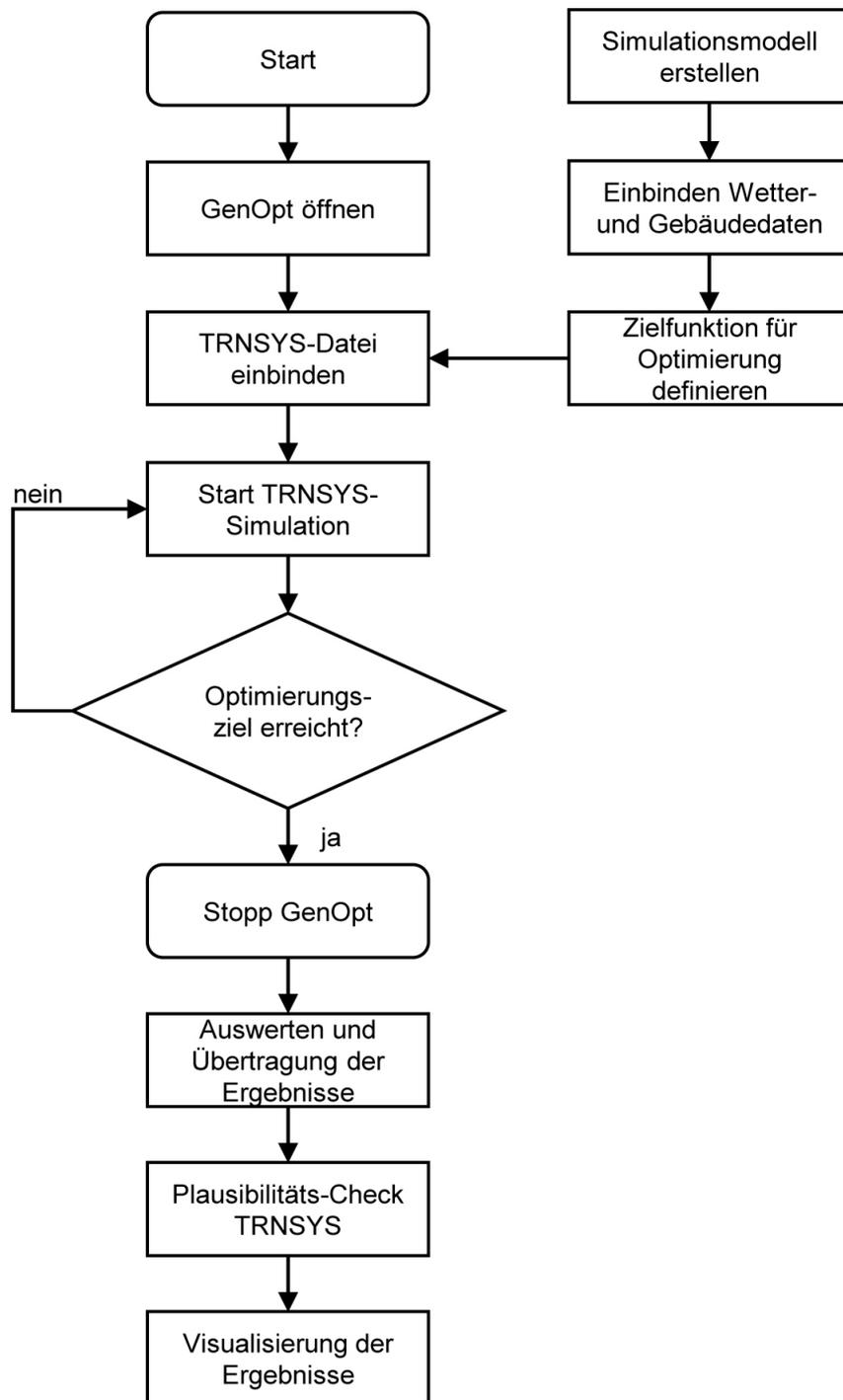


Abbildung 7.9: Flussdiagramm der Simulationsschritte

7.8 Leitgedanke der verwendeten Methodik

Das Vorgehen zeigt, welche Parameter in einer gebäudetechnischen Simulation den größten bzw. den geringsten Einfluss auf die Outputs haben. Dies hilft, in den ersten Leistungsphasen Erkenntnisse über Gebäude und Anlagentechnik zu gewinnen und rechtzeitig an den architektonischen Entwurf anzupassen. Flächen- und Raumbedarfe können so rechtzeitig beachtet und in weiterführende Planungen aufgenommen werden. Das gezeigte Vorgehen erlaubt eine Übertragung auf alle simulationsbasierten Technikkonzepte sowie auf Gebäudesimulationen. Der gewerkeübergreifende Planungsprozess ist mit Beginn der Digitalisierung deutlich schneller. Erkenntnisse aus den ersten Leistungsphasen eines Gebäudes spielen hierdurch eine wichtige Rolle. Hierzu bedarf es einfach handhabbare Methoden zum Kenntnissgewinn, um wettbewerbsfähig zu bleiben und den Anforderungen moderner Planungsmethoden gerecht werden zu können.

7.9 Kurzzusammenfassung

Der Untersuchungsgegenstand besteht aus einem Einzonenmodell, das den Anforderungen eines Niedrigstenergiestandards 2021 entspricht. Zur Beheizung und Kühlung des Gebäudes wird ein, auf regenerativen Energien basierendes, Anlagenkonzept untersucht (siehe Kapitel 7.1).

Das Vorgehen basiert auf einer Zielfunktion, die den Behaglichkeitsanforderungen des Stands der Technik entspricht sowie einer geeigneten Regelung der Anlagentechnik. Innerhalb des Simulationsmodells werden abhängige und unabhängige Variablen definiert (siehe Kapitel 7.2). Durch Sensitivitätsanalysen werden die einflussreichsten Parameter identifiziert und nach der Zielfunktion optimiert (siehe Kapitel 7.3).

In der betrachteten Ausgangssituation weisen die Parameter der Kollektorfläche und der Absorberfläche die größten Standardabweichungen auf. Durch Änderung der Eingangsgrößen dieser Parameter ist die Abweichung vom empirischen Mittelwert am höchsten. Die Eingangsgrößen befinden sich innerhalb eines vorgegebenen Intervalls (siehe Kapitel 7.5).

Mit Hilfe der Screening-Methode nach Morris werden die Standardabweichungen und empirischen Mittelwerte aller Parameter der Ausgangssituation gegenübergestellt (siehe Kapitel 7.5.1).

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

In diesem Kapitel wird das zuvor beschriebene Anlagenmodell und Vorgehen anhand ausgewählter Beispielszenarien aufgeführt und genauer betrachtet. Zum einen werden zukünftige Wetterszenarien angenommen und die Anwendbarkeit unter extremeren Wetterbedingungen betrachtet. Zum anderen wird auf die Bedeutung der Gebäudenutzung sowie der technischen Gebäudeausrüstung in Form der raumluftechnischen Anlagen eingegangen. Abschließend wird die Ausgangssituation, das Wetterszenario für das Jahr 2100 sowie eine Variation der raumluftechnischen Anlagen mithilfe der angesprochenen Verfahren optimiert.

In den nachfolgenden Abbildungen 8.2 bis 8.13 wird stets der Output der Simulation durch Variation der einzelnen Parameter und Varianten auf der linken Seite dargestellt. Auf der rechten Seite wird die Standardabweichung über dem Mittelwert nach Morris der betrachteten Szenarien visualisiert. Beide Seiten der Darstellungen beziehen sich auf die Auswertung eines Parameters.

8.1 Variation Klima

Für die folgende Betrachtung werden vier Klimaszenarien herangezogen. Aufbauend auf dem Testreferenzjahr für München-Riem (2018), welches in aktuellen Simulationsvorgängen herangezogen wird (und in dieser Betrachtung als Ausgangssituation dient, vgl. Kapitel 7.5), werden drei weitere zukünftige Klimaszenarien untersucht. Zu den betrachteten Szenarien zählen die Jahre 2030, 2050 und 2100. Die Klimadaten stammen aus dem dynamischen Klimamodell REMO. Hierbei handelt es sich um ein dynamisches Klimamodell, welches physikalisch komplexe Zusammenhänge des Klimawandels berücksichtigt. Im Vergleich zu weiteren Klimamodellen wird mit diesem Modell eine starke Klimaerwärmung bis 2100 prognostiziert.

Als weitere Randbedingungen dieser Betrachtung werden folgende Einstellungen definiert.

- keine raumluftechnischen Installationen
- interne Lasten: 140 W (PC + Monitor)
- keine künstliche Beleuchtung

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

Durch konstante Annahmen soll gewährleistet werden, dass lediglich der Einfluss der einzelnen Parameter sowie der Einfluss der betrachteten Klimaszenarien auf den Output der Simulation erfasst wird. Analog zum beschriebenen Vorgehen in Kapitel 7 werden alle vier Klimadatensätze gegenübergestellt und nach der Morris-Methode je Parameter ausgewertet.

Bei der Betrachtung der Abbildungen 8.2 bis 8.5 ist erkennbar, dass das Klimaszenario 2100 (schwarzer Verlauf) auf den linken Darstellungen stets den niedrigsten Output aus der Simulation liefert. Hier wird bei allen Parametern die niedrigste Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes erzielt. Dies wird auch auf den rechten Darstellungen deutlich. Hier befinden sich die Resultate stets auf der linken Seite der Abbildung, was einem niedrigeren empirischen Mittelwert gegenüber den anderen betrachteten Klimaszenarien entspricht.

Die Resultate für das Referenzklima (blauer Verlauf) erzielen stets die höchste Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Daraus resultiert ein hoher empirischer Mittelwert (vgl. rechte Darstellung der Abbildungen 8.2 bis 8.5). Die Szenarien 2030 und 2050 weisen untereinander vergleichbare Ergebnisse auf.

8.1.1 Betrachtung der Klimata

Bei dem Vergleich der Ergebnisse zwischen der Ausgangssituation 2018 und dem Klimaszenario 2100 wird deutlich, dass zukünftig mit dem beschriebenen Vorgehen schlechtere Ergebnisse zu erwarten sind. Deutlich wird dies vor allem bei den Parametern Coll_W_m2 und Coll_C_m2 (vgl. Abbildung 8.2 (a) und (c)). Dass die Ergebnisse insgesamt niedriger ausfallen als in der Ausgangssituation, ist auf das deutlich veränderte Klima zurückzuführen. Zukünftige Wetterszenarien, wie es der Datensatz des Jahres 2100 zeigt, werden zu einer Verschiebung der Prioritäten innerhalb von Gebäuden bzw. in der Anlagen- und Gebäudetechnik führen. Abbildung 8.1 (a) und Abbildung 8.1 (b) zeigen beispielhaft die Temperaturabweichungen für die Wetterdaten 2018 und 2100 für die Monate Januar bzw. Juli. Es ist erkennbar, dass der Datensatz 2100 stets eine höhere Temperatur als die Ausgangssituation 2018 vorweist. Daher wird in Zukunft die Kühlung von Gebäuden einen höheren Stellenwert einnehmen als bisher. Für das Heizen kann hingegen davon ausgegangen werden, dass zukünftig weniger Energie benötigt wird. So ist erkennbar, dass in den Wintermonaten die Normaußentemperatur von $\theta_e = -16 \text{ °C}$ im Klimaszenario 2100 nicht erreicht wird (vgl. Abbildung 8.1 (a)). Die niedrigste Außentemperatur beträgt etwa $\theta_e = -12 \text{ °C}$.

Darüber hinaus werden auch in den Sommermonaten extreme Wettersituationen zunehmen, die es den gebäudetechnischen Anlagen erschweren, den Innenraumkomfort aufrecht zu erhalten. So werden im Klimaszenario 2100 Außentemperaturen von bis zu $\theta_e = 35 \text{ °C}$ (gegenüber $\theta_e = 30 \text{ °C}$ im Referenzjahr 2018) erreicht.

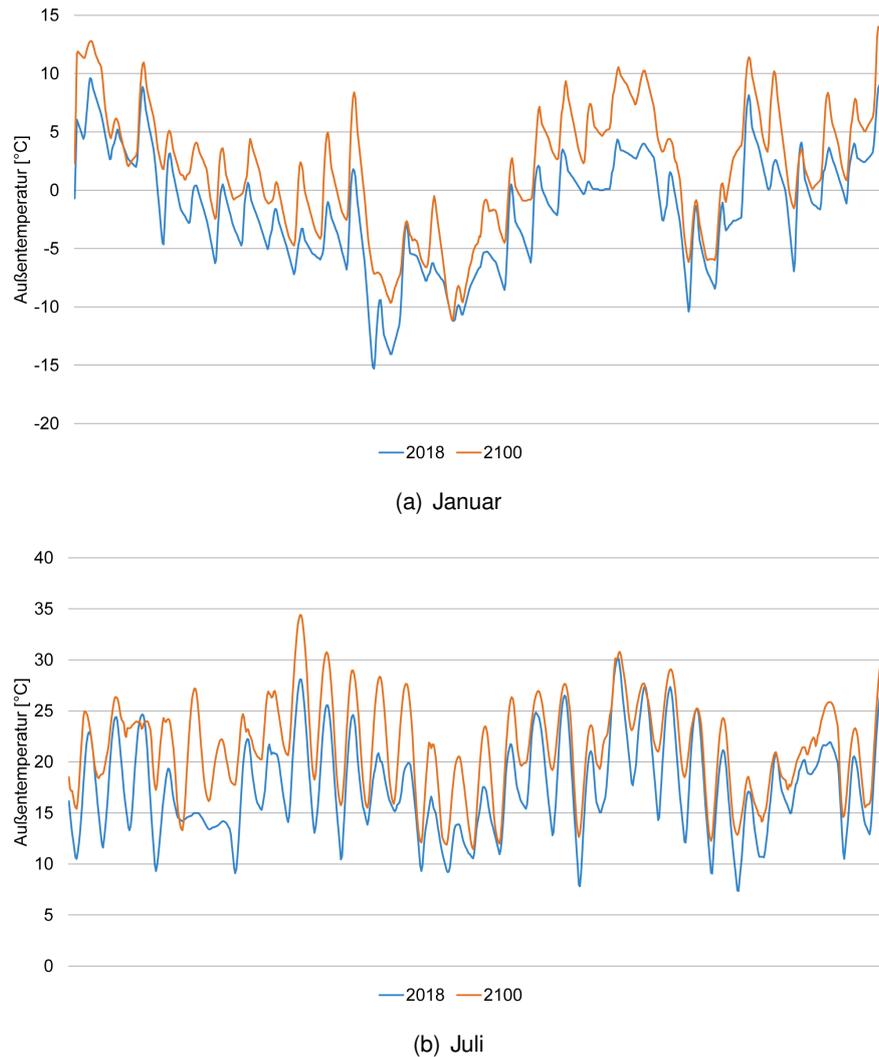


Abbildung 8.1: Trockentemperaturvergleich der Jahre 2018 und 2100

Mit hoher Wahrscheinlichkeit wird sich die Normung bis zum Jahr 2100 entsprechend den klimatischen Randbedingungen anpassen. Daraus werden zukünftig wieder bessere Ergebnisse erzielt werden können. Interessant ist, dass sich der Verlauf der einzelnen Kurven über alle Parameter und Klimaszenarien mit geringen Abweichungen ähnlich verhält. Wie sich die gebäudetechnischen Anlagen für das Szenario 2100 optimal dimensionieren lassen, wird im Rahmen der Optimierung in Kapitel 8.4.1 betrachtet.

8.1.2 Betrachtung der Parameter

Der Verlauf der Ergebnisse ist über alle betrachteten Parameter vergleichbar. Lediglich geringe Abweichungen sind erkennbar. Aus Abbildung 8.2 (a) ist ersichtlich, dass mit steigender Kollektorfläche die Performance der Anlage in allen Klimabetrachtungen merklich verbessert werden kann. Diese Tendenz konnte bereits in der Ausgangssituation aufgezeigt werden (vgl. hierzu Kapitel 7.5.1).

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

Die Anlagengröße der Ausgangssituation beträgt bereits 5 m^2 . Eine Verdopplung der Kollektorfläche führt zu einem Anstieg um 517 Stunden pro Jahr auf 6264 Stunden pro Jahr innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Dies entspricht einem Anstieg von 9 %. Eine größere Dimensionierung der Anlage sollte jedoch einer Machbarkeitsstudie sowie wirtschaftlichen Betrachtungen unterzogen werden, wird aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Ebenso ist eine Tendenz erkennbar, wonach sich die Resultate einem Maximalwert annähern. Da jedoch eine Kollektorfläche $> 10 \text{ m}^2$ für den Referenzraum mit lediglich $11,18 \text{ m}^2$ unrealistisch scheint, wird dies vorerst nicht weiter verfolgt.

Abbildung 8.2 (b) des Parameters Coll_W_m2 zeigt, dass das Szenario 2100 zwar eine geringere Standardabweichung ($s = 797$) aufweist als die anderen Szenarien (2018: 918, 2030: 906, 2050: 877), jedoch auch einen deutlich niedrigeren Mittelwert ($\bar{x} = 4760 \text{ h/a}$) vorzuweisen hat (2018: 5356 h, 2030: 5191 h, 2050: 5225 h). Bei Variation des Parameters Coll_W_m2 können dadurch in diesem Szenario geringere Abweichungen vom empirischen Mittelwert erwartet werden. Dies bedeutet, dass die Änderung des Parameters Coll_W_m2 einen geringeren Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat.

Die Standardabweichung für das Referenzklima ist relativ hoch. Dies bedeutet, dass bereits bei einer geringen Änderung des Parameters Coll_W_m2 ein erheblicher Einfluss auf den Output zu erwarten ist. Vor dieser Herausforderung steht die aktuelle Planung gebäudetechnischer Anlagen. Aus Sicht des Parameters Coll_W_m2 wird eine klimatische Änderung, wie sie im Klimaszenario 2100 gezeigt ist, zu einem konstanteren Betrieb bei abweichender Kollektorfläche führen.

Die Absorberfläche in Abbildung 8.2 (c) weist einen flacheren Verlauf als die Kollektorfläche auf. Auch hier beträgt die ausgelegte Fläche der Ausgangssituation 5 m^2 . Eine Erhöhung dieser Fläche führt nur bedingt zu einer Verbesserung der Ergebnisse. Eine Verdopplung der Absorberfläche führt zu einer Erhöhung um 190 Stunden pro Jahr innerhalb des Behaglichkeitsbandes (+ 3,3 %). In der Ausgangssituation 2018 besteht sogar die Möglichkeit, die Absorberfläche bis auf 2 m^2 bei vergleichbaren Ergebnissen zu reduzieren. Die Abweichung der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes würde lediglich 3 % (bzw. 174 Stunden) betragen. Die empirischen Mittelwerte weisen in der Ausgangssituation den höchsten und im Szenario 2100 den niedrigsten Wert auf (2018: 5701 h, 5474: 5191 h, 2050: 5432 h, 2100: 4855 h). Alle betrachteten Varianten weisen eine hohe Standardabweichung (2018: 223, 2030: 288, 2050: 321, 2100: 269) auf und führen bei variierendem Input zu einer hohen Abweichung des Outputs der Simulation (Abbildung 8.2 (d)).

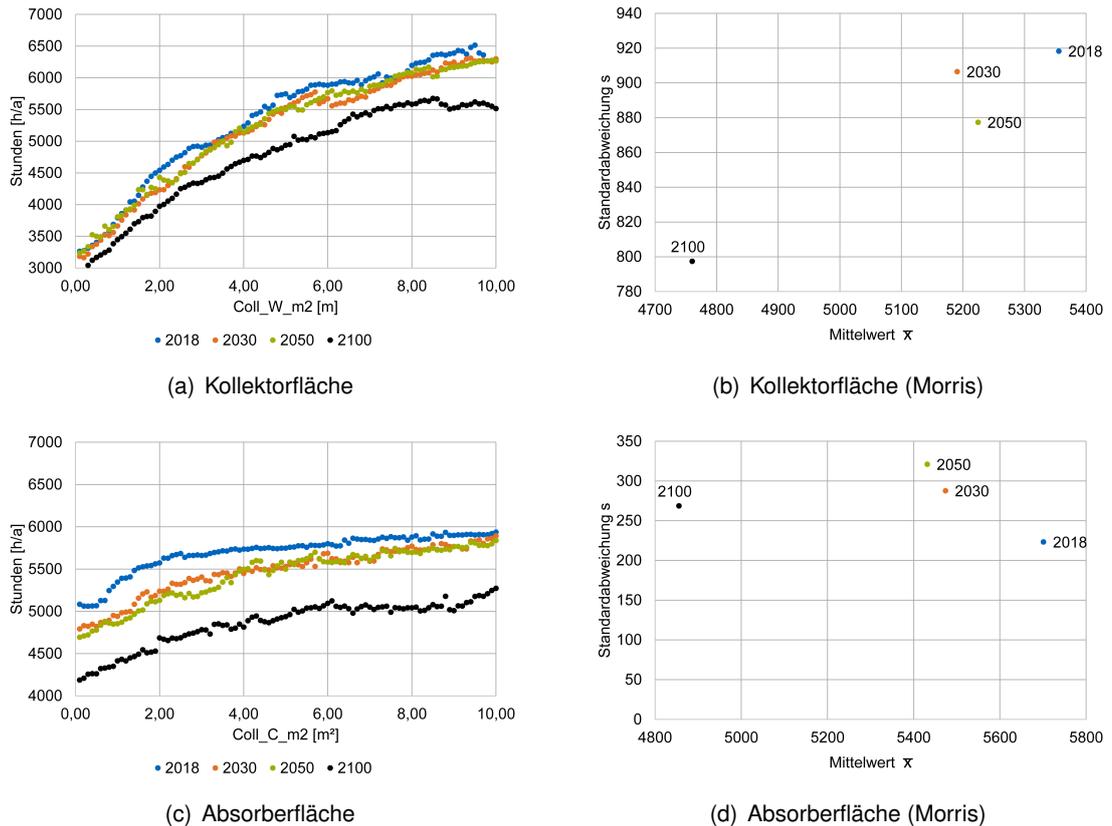


Abbildung 8.2: links: Gegenüberstellung der betrachteten Klimaszenarien sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (1)

Eine Variation der Tankvolumina zeigt, dass der Auslegungszustand des Parameters V_Stor_W von 1 m^3 in der Ausgangssituation 2018 bereits gute Outputs liefert (vgl. Abbildung 8.3 (a)). Eine Reduzierung des Tankvolumens von $0,1\text{ m}^3$ führt zu einer Reduktion von 9 (bzw. 0,1 %) Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Eine Erhöhung des Tankvolumens wirkt sich nicht positiv auf die Anzahl der Stunden aus. Das Tankvolumen des Parameters V_Stor_C kann sogar von $1,0\text{ m}^3$ (dies entspricht der Ausgangssituation) bis auf $0,3\text{ m}^3$ reduziert werden. Dadurch wird eine Erhöhung der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes von 54 Stunden erzielt. Ein größeres Tankvolumen hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes.

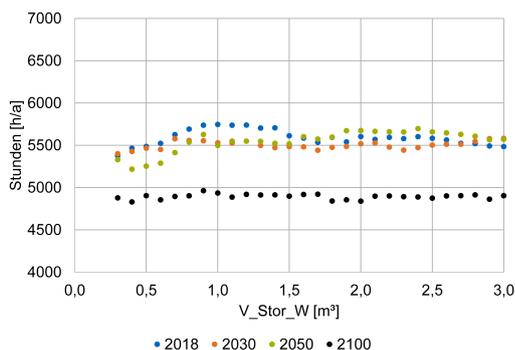
Der Einfluss der klimatischen Änderung wirkt sich jedoch negativ auf die Ergebnisse der Simulation aus. Dies wird sowohl an dem Verlauf des Outputs für den warmen thermischen Speicher (vgl. schwarzer Verlauf der Abbildungen 8.3 (a)) als auch hinsichtlich des kalten thermischen Speichers (vgl. schwarzer Verlauf der Abbildungen 8.3 (c)) deutlich.

Bei Betrachtung des warmen Speichertanks V_Stor_W ist ersichtlich, dass das Szenario 2100 zwar eine geringe Standardabweichung aufweist, jedoch bei einem gleichzeitig niedrigen Mittelwert (vgl. Abbildung 8.3 (b)). Bei den Szenarien 2018 und 2050 werden sowohl hohe Mittelwerte wie auch hohe Standardabweichungen erzielt. Die Ergebnisse des Klimaszenario

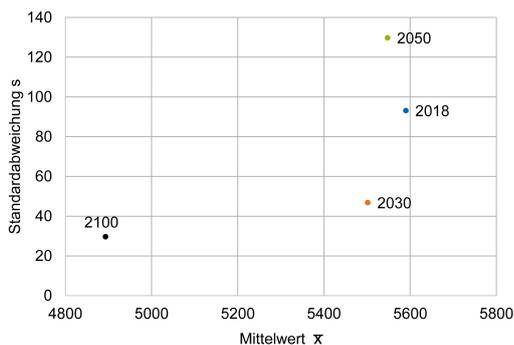
8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

2030 weisen hier die stabilsten Ergebnisse bei einem hohen empirischen Mittelwert bei gleichzeitig niedriger Standardabweichung auf.

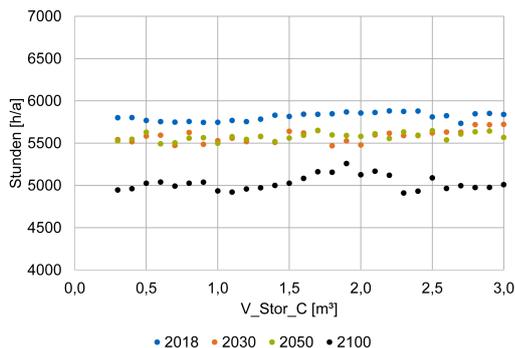
Das kalte thermische Speichervolumen ist im Referenzscenario gut ausgelegt, da es bei einem hohen Mittelwert eine geringe Standardabweichung aufweist und liefern im Vergleich zu den anderen Szenarien die besten Resultate. Das Klimaszenario 2100 hingegen schneidet mit einem niedrigen Mittelwert und einer hohen Standardabweichung in Bezug auf diesen Parameter deutlich schlechter ab.



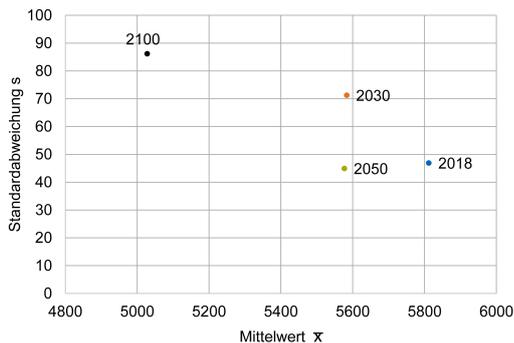
(a) thermisches Speichervolumen warm



(b) thermisches Speichervolumen warm (Morris)



(c) thermisches Speichervolumen kalt



(d) thermisches Speichervolumen kalt (Morris)

Abbildung 8.3: links: Gegenüberstellung der betrachteten Klimaszenarien sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (2)

Die Betrachtung der Parameter der Pumpen innerhalb des Untersuchungsgegenstands zeigt ein vergleichbares Bild wie die Parameter der Kollektor- bzw. Absorberflächen sowie der Tankvolumina. Auch hier liefert das Szenario 2100 stets den niedrigsten empirischen Mittelwert bei vergleichsweise hohen Standardabweichungen (vgl. Abbildung 8.4 (b) und (c) sowie Abbildung 8.5 (b) und (c)). Durch klimatische Veränderungen ist der aktuelle Stand der Pumpenauslegung demnach nicht geeignet.

Hervorzuheben sind aus dieser Betrachtung die erzielten Ergebnisse für die Ausgangssituation 2018. Diese weist für alle Parameter konstante Ergebnisse auf. Dies hat zur Folge, dass die Massenströme der Pumpen reduziert werden können und die Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes kaum eine Änderung erfahren. Es werden stets hohe empirische

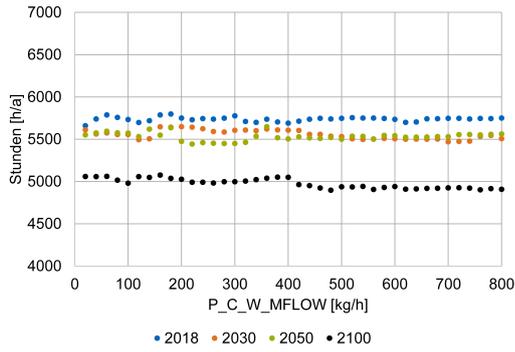
Mittelwerte realisiert. Eine Ausnahme stellt lediglich die Fußbodenheizung dar. Hier wird zwar ein hoher empirischer Mittelwert erreicht, jedoch ist die Standardabweichung im Vergleich zu den anderen Varianten am höchsten (vgl. Abbildung 8.5 (a) und (b)). Mit steigendem Volumenstrom dieser Pumpe kann das System nicht mehr ausreichend Wärme an den Raum abgeben und die Effizienz der Anlage sinkt.

Bei der Betrachtung der Pumpen, die im Kollektor- bzw. Absorberkreis installiert sind, lassen sich annähernd konstante Verläufe der Kurven erkennen (vgl. Abbildung 8.4). Auch hier liefert das Referenzszenario die besten Ergebnisse mit einem hohen Mittelwert und einer niedrigen Standardabweichung. Bei den Verläufen des Klimaszenarios 2100 sind größere Abweichungen erkennbar, zum einen bei niedrigen Massenströmen im Absorberkreis, zum anderen bei steigendem Massenstrom im warmen Kollektorkreis. Dies führt zu niedrigen Mittelwerten und hohen Standardabweichungen in den Abbildungen 8.4 (b) und (d).

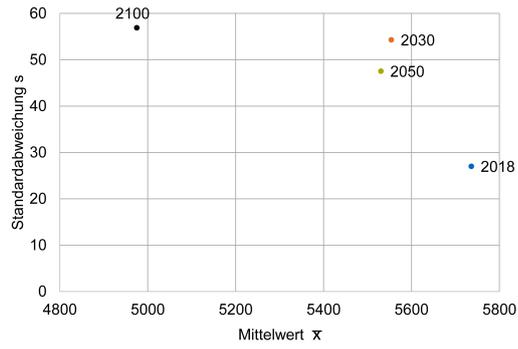
Für die Parameter $P_C_W_MFLOW$, $P_C_C_MFLOW$ und P_CC_MFLOW werden im Klimaszenario 2018 gute Resultate erzielt. Hohe empirische Mittelwerte bei niedrigen Standardabweichungen zeigen, dass eine Variation dieser Parameter nur zu geringen Änderungen der Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes führen. Da diese Parameter in der Betriebsphase eines Gebäudes teils Abweichungen vom Auslegungszustand erfahren (z. B. Abnutzungserscheinungen der Pumpen, Pumpenalter, etc.), kann somit dennoch ein hoher Komfort im Innenraum garantiert werden.

Lediglich der Parameter P_FH_MFLOW zeigt im Verhältnis zu den anderen Szenarien eine hohe Standardabweichung im Szenario 2018. Bei Variation dieses Parameters ist mit hohen Abweichungen von der Ausgangssituation zu rechnen. Bei Zunahme des Massenstroms ist eine deutliche Verschlechterung der Outputs über alle Klimaszenarien erkennbar (Abbildung 8.5 (a)). Dies ist damit zu begründen, dass mit einem zu hohen Massenstrom die Fußbodenheizung keine Wärme an den Raum abgibt, weil das Medium im Rücklauf eine zu hohe Temperatur hat.

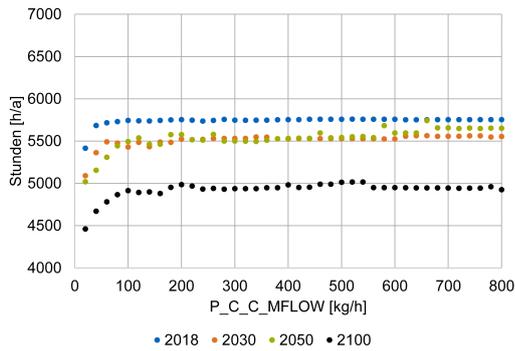
8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells



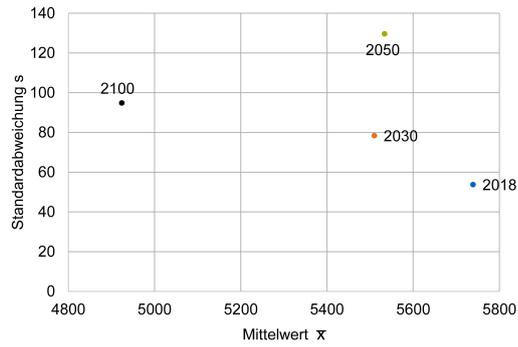
(a) Pumpe Kollektor warm



(b) Pumpe Kollektor warm (Morris)

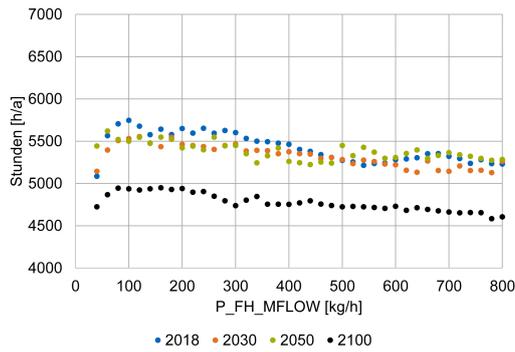


(c) Pumpe Kollektor kalt

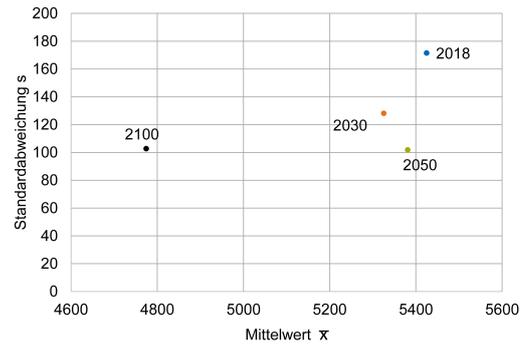


(d) Pumpe Kollektor kalt (Morris)

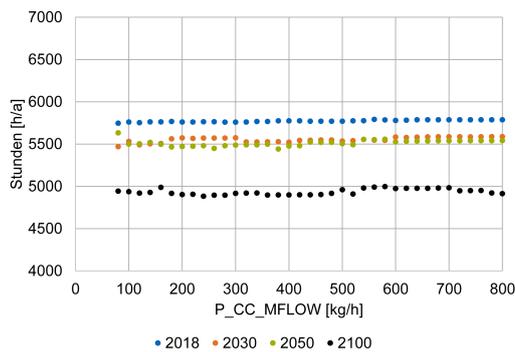
Abbildung 8.4: links: Gegenüberstellung der betrachteten Klimaszenarien sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (3)



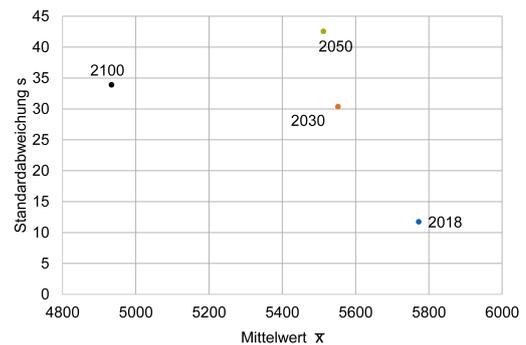
(a) Pumpe Fußbodenheizung



(b) Pumpe Fußbodenheizung (Morris)



(c) Pumpe Deckenkühlung kalt



(d) Pumpe Deckenkühlung (Morris)

Abbildung 8.5: links: Gegenüberstellung der betrachteten Klimaszenarien sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (4)

Die Anwendung der Morris Methode verdeutlicht, dass das Klimaszenario 2100 bei allen Parametern den geringsten Mittelwert aufweist (vgl. hierzu jeweils die Darstellungen (b) und (d) in den Abbildungen 8.2 bis 8.5). Darüber hinaus wird deutlich, dass die Kollektorfläche (Coll_W_m2) und die Absorberfläche (Coll_C_m2) die entscheidenden Komponenten zur Erlangung einer hohen Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes sind.

8.2 Variation der internen Lasten

Bedingt durch die steigende Effizienz elektrischer Anwendungen in büroähnlichen Nutzungen werden hier die Anschlussleistungen von PC und Drucker innerhalb des Untersuchungsgegenstands als Variation der internen Lasten betrachtet. Hierbei kommen sechs Varianten zum Einsatz: 140 W, 130 W, 110 W, 90 W und 70 W. Die Nutzung entspricht den Vorgaben der VDI 2078.

Randbedingungen dieser Betrachtung:

- keine raumluftechnischen Installationen
- keine künstliche Beleuchtung

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

- Klimaszenario 2018

Nachfolgende Abbildungen 8.6 bis 8.9 zeigen den Einfluss der Variation der Parameter auf die Outputs der Simulation sowie die Auswertung nach Morris unter Variation der internen Lasten im Referenzraum.

Auch hier ist erkennbar (im Vergleich zur Variation des Klimas in Kapitel 8.1), dass der Parameter Coll_W_m2 bei variierenden Eingangswerten stark streut. Allerdings liegen die Resultate bei allen betrachteten Szenarien in einem vergleichsweise ähnlichen Bereich. Abbildung 8.6 (a) weist eine starke Variation des Outputs durch Erhöhung der Kollektorfläche auf. Durch Verdopplung der Kollektorfläche von 5 m² auf 10 m² kann eine Erhöhung der Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes von 8,9% (+ 516 Stunden) erzielt werden. Bei der Auswertung nach Morris ist jedoch erkennbar, dass die Variante 140 W die geringste Standardabweichung bei gleichzeitig niedrigstem Mittelwert aufweist (vgl. Abbildung 8.6 (b)). Die 140 W Variante trägt somit zu einem stabilen Betrieb der Anlage bei, kann sich aber nicht positiv auf eine maximale Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes auswirken. Dies bezieht sich jedoch nur auf den Vergleich der Varianten untereinander. Eine Standardabweichung von > 900 ist im Vergleich zu den weiteren Parametern hoch. Die Kollektorkreispumpe des Absorberkreises hat beispielsweise nur eine maximale Standardabweichung von 37.

Bei Betrachtung des Parameters Coll_C_m2 sind bei niedrigen Absorberflächen starke Unterschiede erkennbar (vgl. Abbildung 8.6 (c)). So wird eine hohe Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes bei 70 W internen Lasten erzielt. Mit steigenden internen Lasten nimmt die Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes ab. Da sich hohe interne Lasten negativ auf die Kühllast auswirken, ist dieses Ergebnis akzeptabel. Jedoch nähern sich die Werte der betrachteten Szenarien ab einer Absorberfläche von ca. 3 m² an. Bei weiter steigender Absorberfläche können nur noch geringfügige Unterschiede zwischen den betrachteten Varianten festgestellt werden. Ebenso können nur geringe Verbesserungen durch Erhöhung der Absorberfläche identifiziert werden. So führt eine Verdopplung der Absorberfläche im Szenario 70 W nur zu einer Verbesserung von 1 % der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes.

Die Betrachtung nach Morris des Parameters Coll_C_m2 zeigt deutlich, dass niedrige interne Lasten (70 W, 90 W) aus Sicht der Gebäudekühlung (Absorberfläche) zu einem hohen empirischen Mittelwert bei gleichzeitig niedriger Standardabweichung führen. Auf der anderen Seite haben hohe interne Lasten (110 W, 130 W, 140 W) einen negativen Einfluss auf die Simulationsoutputs in Form von niedrigen empirischen Mittelwerten und hohen Standardabweichungen.

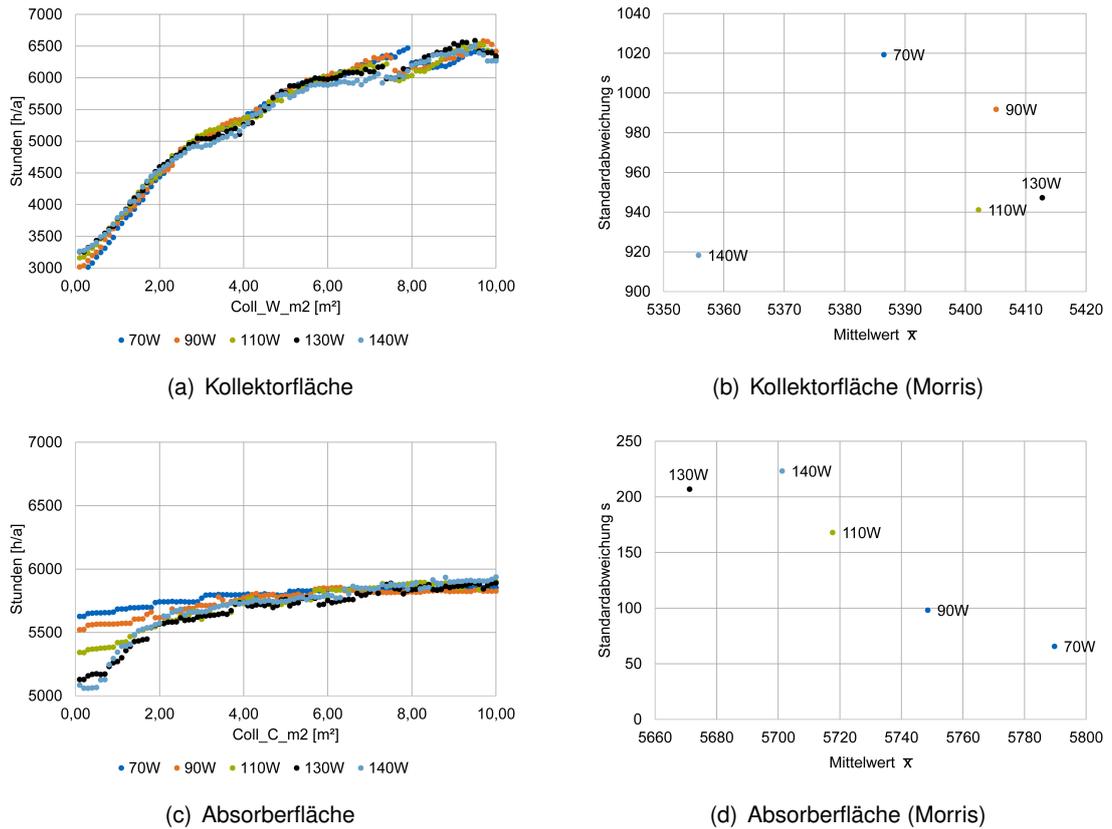


Abbildung 8.6: links: Gegenüberstellung der betrachteten, internen Lasten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (1)

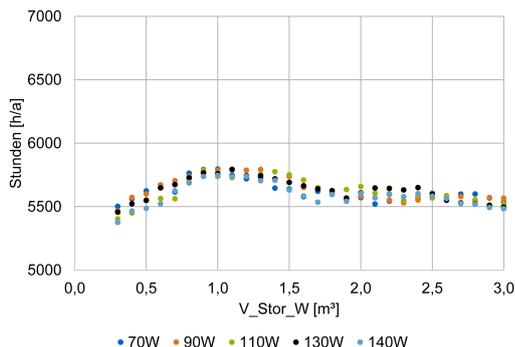
Abbildung 8.7 zeigt die Resultate für den warmen und kalten sensiblen thermischen Speicher. Der warme Speicher weist in allen Varianten bei 1,0 m³ das Maximum der Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes auf (vgl. Abbildung 8.7 (a)). Mit steigendem Volumen fällt die Anzahl der Stunden bei allen betrachteten Varianten ab. Die Variation der internen Lasten hat kaum Auswirkungen auf das Speichervolumen der warmen thermischen Speichers. So weichen sich die Resultate bei 1,0 m³ im Maximum um 0,8 % von einander ab.

Durch den vergleichsweise ähnlichen Verlauf der Kurven bewegen sich die Standardabweichungen aller betrachteten Varianten auf einem gleichen Niveau (vgl. Abbildung 8.7 (b)). Die empirischen Mittelwerte weichen etwas von einander ab, jedoch sind diese Unterschiede gering, da der Mittelwert lediglich um 40 Stunden vom niedrigsten (140 W) zum höchsten empirischen Mittelwert (90 W) abweicht.

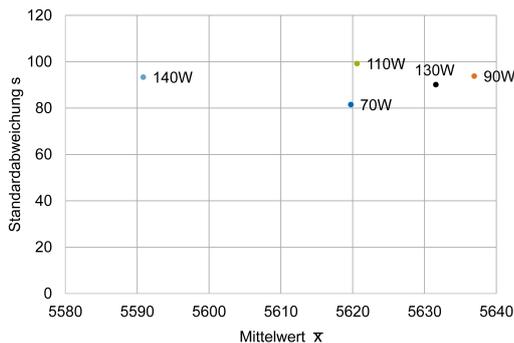
Bei der Betrachtung des kalten Speichers sind ebenfalls ähnliche Verläufe der betrachteten Varianten sichtbar (vgl. Abbildung 8.7 (c)). Durch Variation des Volumens sind nur geringe Abweichungen und kaum bessere Resultate erkennbar. Das Speichervolumen in allen betrachteten Varianten kann jedoch deutlich reduziert werden und führt dadurch zu einer Erhöhung der Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes. So führt eine Reduktion des Speichervolumens von 1,0 m³ auf 0,3 m³ zu einer Erhöhung der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes von 1,6 %.

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

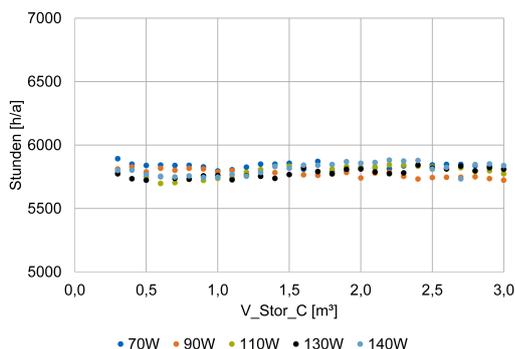
Variante 70 W hat bei einem hohen Mittelwert eine geringe Standardabweichung (vgl. Abbildung 8.7 (d)). Niedrige interne Lasten wirken sich positiv auf die Kühllast eines Gebäudes aus. Hohe interne Lasten haben hingegen einen positiven Einfluss auf die Heizlast eines Gebäudes. So kann der warme thermische Speicher bei hohen internen Lasten (140 W) niedriger dimensioniert werden, da die internen Lasten den Raum zusätzlich aufheizen. Auf der anderen Seite kann bei niedrigen internen Lasten (70 W) der kalte thermische Speicher kleiner dimensioniert werden, da die Wärme, die von internen Lasten an den Raum abgegeben wird, nicht zusätzlich heruntergekühlt werden muss.



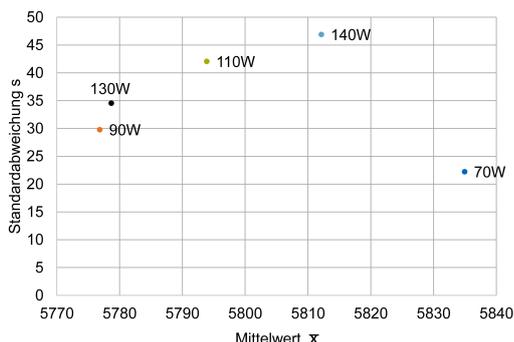
(a) thermisches Speichervolumen warm



(b) thermisches Speichervolumen warm (Morris)



(c) thermisches Speichervolumen kalt

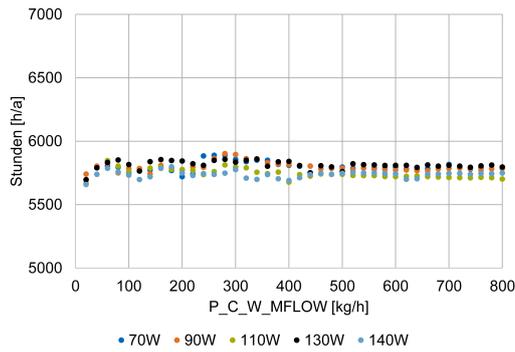


(d) thermisches Speichervolumen kalt (Morris)

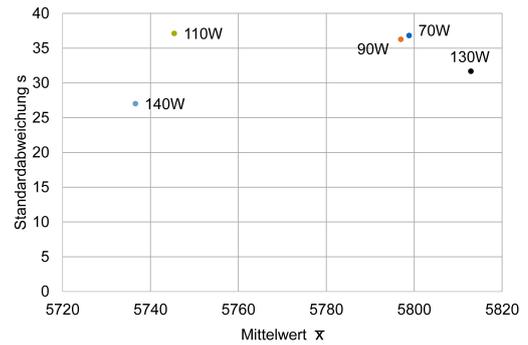
Abbildung 8.7: links: Gegenüberstellung der betrachteten, internen Lasten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (2)

Die Kurven der Parameter $P_{C_W_MFLOW}$ und $P_{C_C_MFLOW}$ bewegen sich über alle betrachteten Varianten in einem vergleichbaren Bereich bzgl. der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes (vgl. Abbildung 8.8 (a) und (c)). Auch die Standardabweichungen für alle Szenarien sind bei diesen beiden Parametern verhältnismäßig niedrig (vgl. Abbildung 8.8 (b) und (d)). In der Variante 70 W führt eine Reduzierung des Massenstroms des Parameters $P_{C_W_MFLOW}$ von 500 kg/h auf 300 kg/h zu einer Erhöhung der Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes von 1,0 %. Ähnlich verhält es sich bei den anderen Varianten (90 W: 1,8 %, 110 W: 1,0 %, 130 W: 1,3 %, 140 W: 0,5 %).

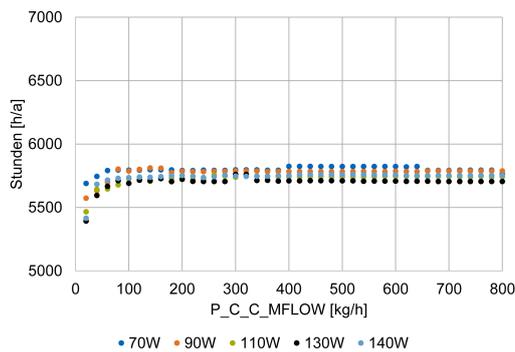
8.2 Variation der internen Lasten



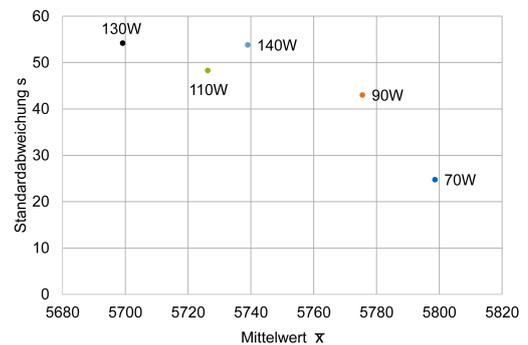
(a) Pumpe Kollektor warm



(b) Pumpe Kollektor warm (Morris)



(c) Pumpe Kollektor kalt

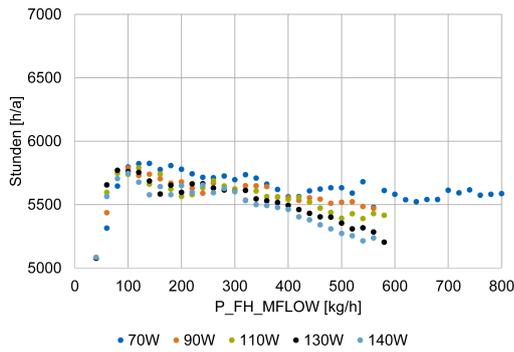


(d) Pumpe Kollektor kalt (Morris)

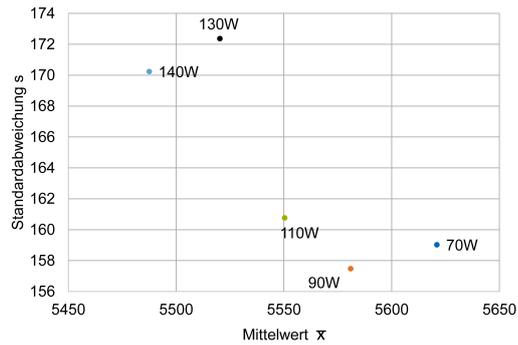
Abbildung 8.8: links: Gegenüberstellung der betrachteten, internen Lasten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (3)

Abbildung 8.9 zeigt die Ergebnisse für die Parameter P_{FH_MFLOW} und P_{CC_MFLOW} . Die Pumpe der Deckenkühlung zeigt bei allen Varianten einen ähnlichen Verlauf bei Änderung des Massenstroms (vgl. Abbildung 8.9 (c)). Daraus resultieren Ergebnisse mit niedrigen Standardabweichungen und Mittelwerten, die relativ nah beieinander liegen (vgl. Abbildung 8.9 (d)). Die Pumpe der Fußbodenheizung hingegen weist starke Abweichungen auf. Bereits bei ca. 100 kg/h Massenstrom sind die Höchstwerte erreicht. Mit steigendem Massenstrom nimmt der Output aus der Simulation ab. Bei den Varianten 90 W, 110 W, 130 W und 140 W brechen die Simulationen bei einem Massenstrom von 580 kg/h sogar ab und liefern keine Ergebnisse.

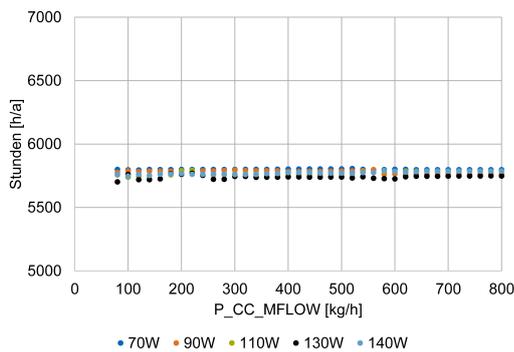
8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells



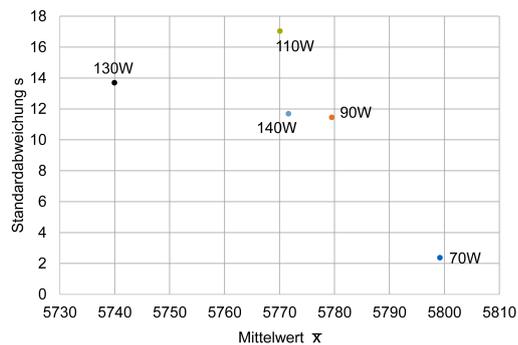
(a) Pumpe Fußbodenheizung



(b) Pumpe Fußbodenheizung (Morris)



(c) Pumpe Deckenkühlung



(d) Pumpe Deckenkühlung (Morris)

Abbildung 8.9: links: Gegenüberstellung der betrachteten, internen Lasten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (4)

8.3 Variation raumluftechnischer Anlagen

Bei der Betrachtung der raumluftechnischen Anlagen wird die Luftwechselrate innerhalb des Untersuchungsgegenstandes variiert. Hierzu werden die Angaben zum Zuluftvolumenstrom anhand des Raumvolumens angegeben. Es werden 5 unterschiedliche Luftwechselraten betrachtet: $0,2 \text{ h}^{-1}$, $0,4 \text{ h}^{-1}$, $0,6 \text{ h}^{-1}$, $0,8 \text{ h}^{-1}$ und $1,0 \text{ h}^{-1}$. Nach [18] ist eine Luftwechselrate von $0,6 \text{ h}^{-1}$ gefordert. Um den Einfluss bei variierender Luftwechselrate zu identifizieren werden höhere und niedrigere Luftwechselraten analysiert.

Randbedingungen dieser Betrachtung sind:

- interne Lasten: 140 W (PC + Monitor)
- keine künstliche Beleuchtung
- Klimaszenario 2018

Abbildung 8.10 zeigt die Verläufe der Kurven für die Variation der Parameter Coll_W_m2 und Coll_C_m2 sowie die Auswertung nach Morris. Die Ergebnis der unterschiedlichen Varianten der Kollektorfläche weisen ähnliche Verläufe auf. Je höher die Luftwechselrate, desto höher

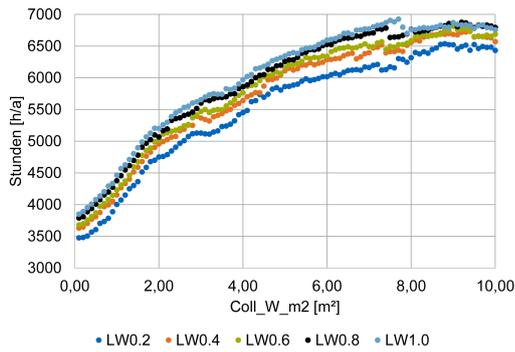
ist die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes (vgl. Abbildung 8.10 (a)). Niedrige Luftwechselraten (z. B. $LW_{0.2} = 0,2 \text{ h}^{-1}$) weisen eine geringere Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes auf. Dies spiegelt sich auch in Abbildung 8.6 (b) wider. Je niedriger die Luftwechselrate, desto niedriger der empirische Mittelwert. Die Variante $LW_{1.0}$ zeigt bei der Betrachtung nach Morris den höchsten Mittelwert und gleichzeitig die niedrigste Standardabweichung. Da mehr konditionierte Luft in den Innenraum kommt, wird ein konstanter Betrieb der Anlage innerhalb des Behaglichkeitsbandes in Variante $LW_{1.0}$ realisiert.

Auch in dieser Betrachtung wird deutlich, dass sich die Resultate bei steigender Kollektorfläche einem Maximalwert von ca. 7000 Stunden annähern. Bei einer Luftwechselrate von $1,0 \text{ h}^{-1}$ und einer Kollektorfläche von 5 m^2 befinden sich 6345 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Der Peak dieser Kurve wird bei einer Kollektorfläche von $7,70 \text{ m}^2$ (dies entspricht 6925 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes) erreicht. Durch Vergrößerung der Anlage um $2,70 \text{ m}^2$ kann die Performance der Anlage um 9,14% verbessert werden (vgl. hellblaue Kurve in Abbildung 8.10 (a)).

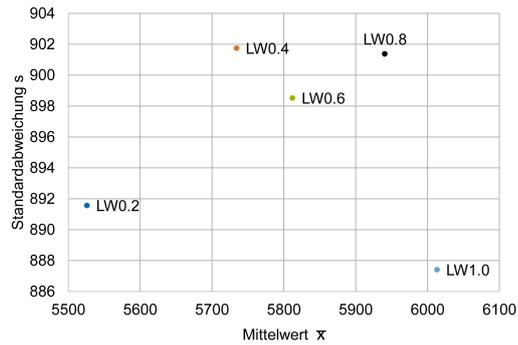
Bei niedrigen Luftwechselraten von $0,2 \text{ h}^{-1}$ kann ebenfalls eine Erhöhung der Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes durch Vergrößerung der Kollektorfläche realisiert werden. Hier kann das Ergebnis um 11,51 % verbessert werden, allerdings muss hierzu die Anlage um $3,8 \text{ m}^2$ erweitert werden.

Bei der Betrachtung der Absorberfläche wird deutlich, dass bei niedrigen Absorberflächen ($0,1 - 3,0 \text{ m}^2$) große Abweichungen zwischen den unterschiedlichen Luftwechselraten vorherrschen (vgl. Abbildung 8.6 (c)). Auch hier können mit einer Vergrößerung der Absorberfläche bessere Resultate erzielt werden. Je höher die Luftwechselrate, desto konstanter sind die Simulationoutputs. Dies kann gut an der Betrachtung nach Morris erkannt werden (vgl. Abbildung 8.6 (d)). Hier sieht man, dass mit steigender Luftwechselrate der empirische Mittelwert zu- und die Standardabweichung gleichzeitig abnimmt.

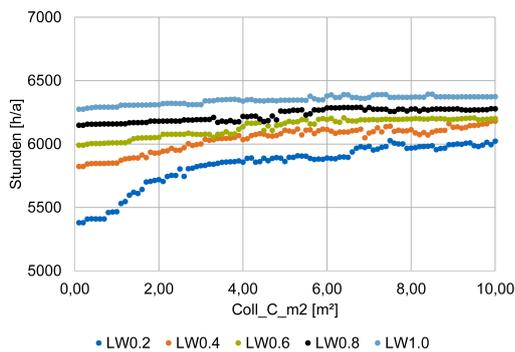
8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells



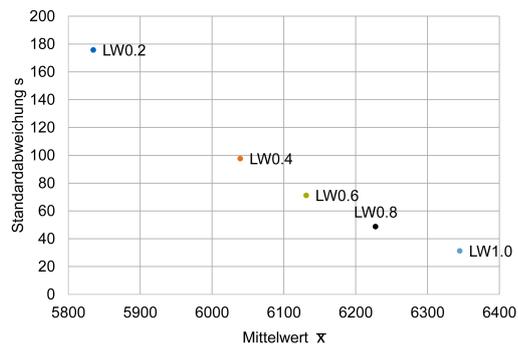
(a) Kollektorfläche



(b) Kollektorfläche (Morris)



(c) Absorberfläche



(d) Absorberfläche (Morris)

Abbildung 8.10: Links: Gegenüberstellung der betrachteten Luftwechselraten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (1)

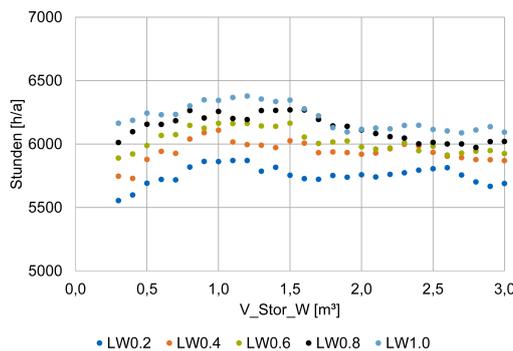
Auch bei den Parametern V_{Stor_W} und V_{Stor_C} werden mit steigender Luftwechselrate deutlich bessere Ergebnisse (Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes) erzielt (vgl. hellblaue Kurven der Variante LW1.0 gegenüber der dunkelblauen Kurven der Variante LW0.2 in den Abbildungen 8.11 (a) und (c)). Die Kurven der unterschiedlichen Luftwechselraten des Parameters V_{Stor_W} weisen einen vergleichbaren Verlauf auf. Bereits bei einem Speichervolumen von $1,0 \text{ m}^3$ können gute Resultate erzielt werden (5862 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes). Durch Erhöhung der Speichervolumens auf $1,2 \text{ m}^3$ kann der Maximalwert für die Variante LW0.2 erzielt werden (5871 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes). Dies entspricht jedoch nur einer Verbesserung um 0,15%. Durch Reduzierung des Speichervolumens auf $0,9 \text{ m}^3$ kann die gleiche Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes erreicht werden. Auch bei hohen Luftwechselraten von $1,0 \text{ h}^{-1}$ kann eine Vergrößerung des Speichervolumens von $0,2 \text{ m}^3$ zu einer geringfügigen Verbesserung der Resultate führen (+0,5%). Jedoch ist es sinnvoller, das Speichervolumen ebenfalls auf $0,9 \text{ m}^3$ zu reduzieren, da hier die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes um 4 Stunden erhöht werden kann.

Bei der Auswertung nach Morris der Parameters V_{Stor_W} wird deutlich, dass steigende Luftwechselraten zu einer Erhöhung des empirischen Mittelwerts führen und somit die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes erhöht werden kann. Gleichzeitig nimmt

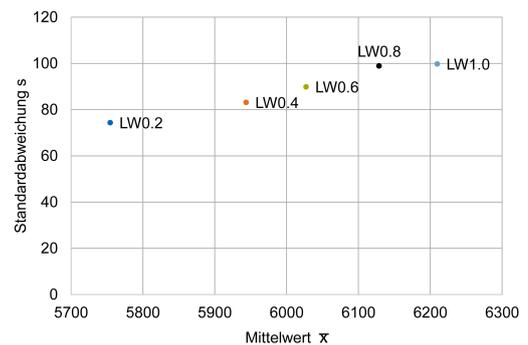
allerdings die Standardabweichung zu. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse durch Variation des Parameters stärker vom empirischen Mittelwert abweichen.

Der Parameter V_{Stor_C} zeigt über alle betrachteten Varianten einen ähnlichen Verlauf auf (vgl. Abbildung 8.11 (c)). Mit steigender Luftwechselrate nimmt die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes zu. Mit steigendem Speichervolumen kann allerdings keine Zunahme der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes identifiziert werden. Lediglich bei der Variante LW0.2 kann durch einen Anstieg des Speichervolumens von $1,0 \text{ m}^3$ auf $2,8 \text{ m}^3$ eine Erhöhung der Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes von 2,17% realisiert werden. Allerdings scheint es hier sinnvoller und nachhaltiger, das Speichervolumen auf $0,6 \text{ m}^3$ zu reduzieren und somit eine Erhöhung der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes um + 1,19% zu erreichen.

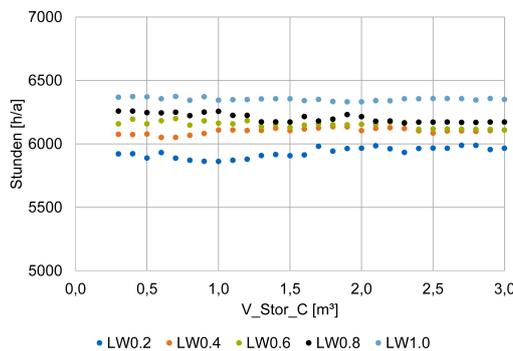
Durch die konstanten Verläufe der Graphen in Abbildung 8.11 (c) werden in allen betrachteten Varianten niedrige Standardabweichungen erzielt. LW0.2 hat mit einer Standardabweichung von $s = 40$ zwar die höchste Standardabweichung, allerdings ist diese im Vergleich zu den anderen Parametern niedrig. Auch hier führt die Erhöhung der Luftwechselrate zu höheren empirischen Mittelwerten und führt somit zu einer Erhöhung der Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes.



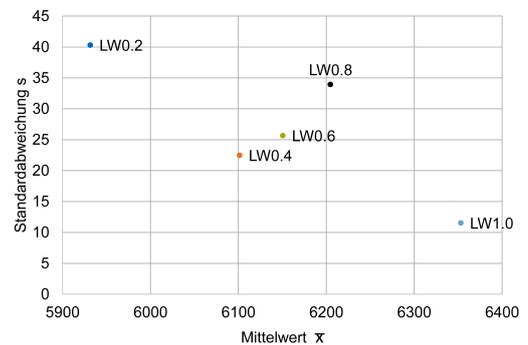
(a) thermisches Speichervolumen warm



(b) thermisches Speichervolumen warm (Morris)



(c) thermisches Speichervolumen kalt

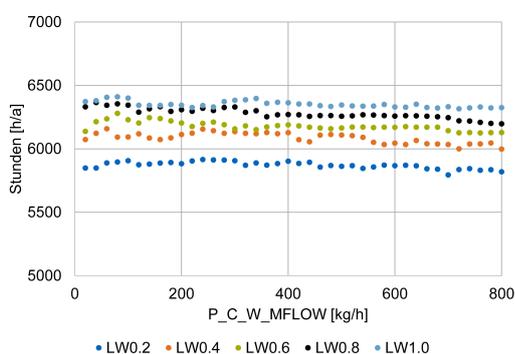


(d) thermisches Speichervolumen kalt (Morris)

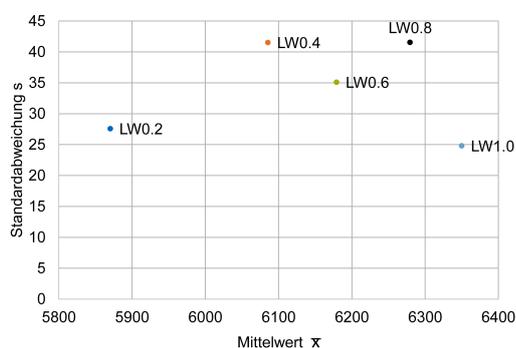
Abbildung 8.11: Links: Gegenüberstellung der betrachteten Luftwechselraten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (2)

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

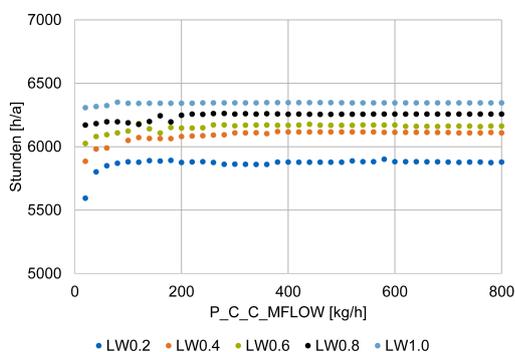
Abbildung 8.12 zeigt die Outputs der Parameter $P_C_W_MFLOW$ und $P_C_C_MFLOW$. Mit steigender Luftwechselrate werden auch hier höhere empirische Mittelwerte des Outputs erzielt. Die Mittelwerte nehmen mit jeder Erhöhung der Luftwechselrate zu (vgl. Abbildung 8.8 (b) und (d)). Auch hier sind die Standardabweichungen im Vergleich zu den Parametern $Coll_W_m2$ und $Coll_C_m2$ sehr niedrig. Diese fällt beim Parameter $P_C_W_MFLOW$ bis zu einem Wert von 8 bei Variante LW1.0. Dieser Wert ist sehr gering und eine Variation des Parameters hat fast keinen Einfluss auf die Outputs der Simulation. Eine Abweichung der Massenstroms dieser Pumpen hat nur einen geringen Einfluss auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Dies ist damit zu begründen, dass im Kühlfall die Deckenkühlung einen geringen Einfluss auf den Wärmeabtransport im Innenraum hat. Die raumluftechnischen Anlagen übernehmen an dieser Stelle die Konditionierung des Innenraums.



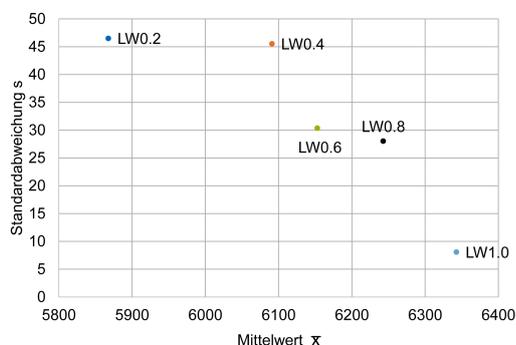
(a) Pumpe Kollektor warm



(b) Pumpe Kollektor warm (Morris)



(c) Pumpe Kollektor kalt



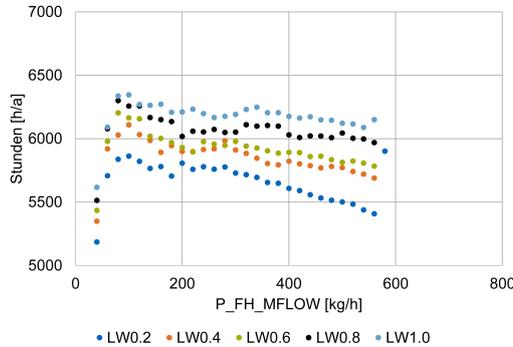
(d) Pumpe Kollektor kalt (Morris)

Abbildung 8.12: Links: Gegenüberstellung der betrachteten Luftwechselraten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (3)

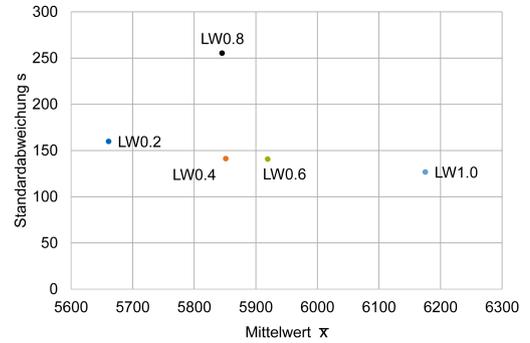
In Abbildung 8.13 werden die Ergebnisse der Parameter P_FH_MFLOW und P_CC_MFLOW dargestellt. Die Resultate des Parameters P_CC_MFLOW sind vergleichbar zu den Parametern $P_C_W_MFLOW$ und $P_C_C_MFLOW$.

Die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes nehmen mit zunehmendem Massenstrom des Parameters P_FH_MFLOW ab. Vergleichbar zur Untersuchung des Einflusses interner Lasten werden ab einem Massenstrom von 580 kg/h keine Ergebnisse produziert,

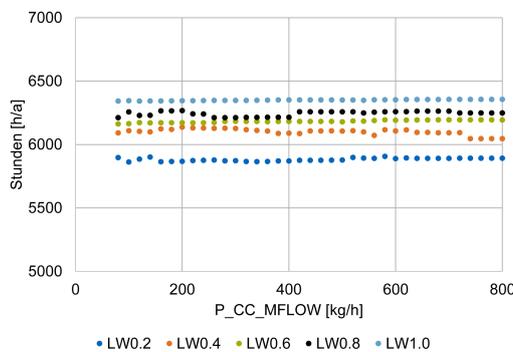
da die Simulation abbricht. Die Variation des Massenstroms hat erheblichen Einfluss auf die Outputs der Simulation. Diese Entwicklung ist über alle betrachteten Varianten erkennbar. Variante LW1.0 ist im Vergleich zu den anderen Varianten mit einer niedrigen Standardabweichung und einem hohen Mittelwert stets die beste Variante.



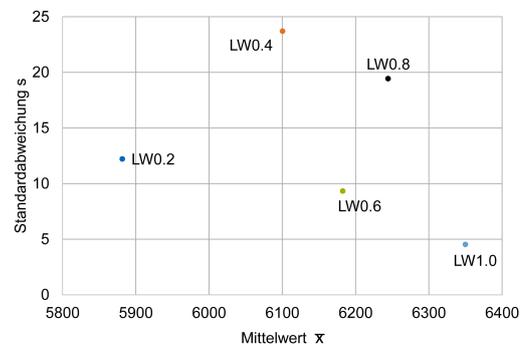
(a) Pumpe Fußbodenheizung



(b) Pumpe Fußbodenheizung (Morris)



(c) Pumpe Deckenkühlung



(d) Pumpe Deckenkühlung (Morris)

Abbildung 8.13: Links: Gegenüberstellung der betrachteten Luftwechselraten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (4)

8.4 Optimierung der betrachteten Szenarien

Bei der Betrachtung der Parameter bei allen Varianten zeigt sich, dass die Parameter Coll_W_m2, Coll_C_m2 und P_FH_MFLOW die höchsten Standardabweichungen von ihren empirischen Mittelwerten aufweisen. Diese führen durch geringe Variation des Eingangswertes der Simulation zu einer größeren Abweichung (Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes) der Outputs der Simulation.

Die Parameter V_Stor_W, V_Stor_C, P_C_W_MFLOW, P_C_W_MFLOW und P_CC_MFLOW weisen geringe Standardabweichungen von ihren empirischen Mittelwerten auf. Eine Abweichung von den Eingangswerten der Simulation hat demnach nur geringen Einfluss auf die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes.

Da die Simulationen bei steigendem Massenstrom des Parameters P_FH_MFLOW nicht durchgeführt werden konnten, wird dieser Parameter in der Optimierung nicht weiter betrachtet. Da die Parameter V_Stor_W, V_Stor_C, P_C_W_MFLOW, P_C_W_MFLOW und P_CC_MFLOW durch Variation nur geringen Einfluss auf die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes haben, werden auch diese Parameter für die Optimierung nicht weiter betrachtet und erhalten einen fixen Eingangswert für die Optimierungsvorgänge. Für die Durchführung der Optimierung werden die Parameter Coll_W_m2 und Coll_C_m2 gewählt.

In den folgenden Kapiteln wird das beschriebene Optimierungsverfahren in den Klimaszenarien 2018 und 2100, Variation interner Lasten und Variation raumluftechnischer Anlagen analog zu Kapitel 8.1, 8.2 und 8.3 angewandt. Durch die Analyse der Parameter wurden einflussreiche von weniger einflussreichen Parametern unterschieden. Es werden die Ergebnisräume der jeweiligen Extremsituationen dargestellt. Es wird nur ein deterministisches Optimierungsverfahren durchgeführt, da der Ergebnisraum relativ klein ist und mit einem deterministischen Verfahren ein absolutes Optimum der Zielfunktion erzielt werden kann.

8.4.1 Optimierung Variation Klima

Abbildung 8.14 zeigt den Ergebnisraum bzw. den Einfluss der Parameter Coll_W_m2 und Coll_C_m2 für die Resultate der Zielfunktion (Zahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes). Auf der x-Achse und y-Achse werden die Parameter dargestellt. Die Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes werden auf der z-Achse dargestellt. Es ist erkennbar, dass durch Anstieg des Parameters Coll_W_m2 (Variation der Kollektorfläche zwischen 1,0 und 10,0 m²) in beiden Klimaszenarien ein deutlicher Anstieg der Ergebnisse ausgegeben wird. Der Einfluss des Parameters Coll_C_m2 führt hingegen nur bedingt zu einem Anstieg der Outputs.

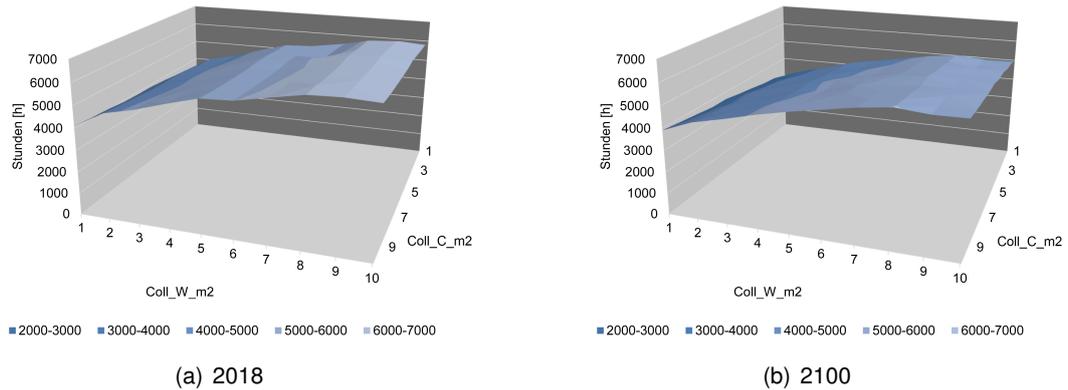


Abbildung 8.14: Dreidimensionaler Ergebnisraum der Klimaszenarien 2018 (a) und 2100 (b)

Die Resultate des Klimaszenarios 2100 (vgl. Abbildung 8.14 (b)) weisen einen ähnlichen Verlauf auf, wie das Szenario 2018 (vgl. Abbildung 8.14 (a)). Die Ergebnisse befinden sich insgesamt in einem niedrigeren Bereich und führen demnach zu einer geringeren Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Darüber hinaus ist der Verlauf der Fläche im Szenario 2100 flacher als im Szenario 2018. Hier kann durch eine Erhöhung der Kollektor- bzw. Absorberfläche nur ein geringerer Anstieg der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes erzielt werden.

In Tabelle 8.1 sind die Resultate des Optimierungsverfahrens aufgeführt. Im Klimaszenario 2018 wird mit Durchführung der Optimierung ein Wert von 5947 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes ausgegeben. Dieses Maximum wird bei den Werten $\text{Coll_W_m}^2 = 8,85 \text{ m}^2$ und $\text{Coll_C_m}^2 = 5,03 \text{ m}^2$ erreicht. Dies entspricht einer Erhöhung der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes gegenüber der Ausgangssituation ($\text{Coll_W_m}^2 = 5,00 \text{ m}^2$ und $\text{Coll_C_m}^2 = 5,00 \text{ m}^2$) von 3,48%.

Tabelle 8.1: Resultate des Optimierungsverfahrens bei der Variation des Klimas

Parameter	Ergebnis 2018	Ergebnis 2100
Coll_W_m2	8,85 m ²	5,21 m ²
Coll_C_m2	5,03 m ²	5,19 m ²
Anzahl Stunden	5947	5151

Es wird deutlich, dass der Parameter Coll_C_m2 im Ausgangsszenario nach Normung bereits gut und ausreichend dimensioniert ist. Über eine Erhöhung des Parameters Coll_W_m2 von 5 m² auf 8,85 m² können 200 Stunden zusätzlich innerhalb des Behaglichkeitsbandes erzielt werden werden. Im Ausgangsszenario wurden 5747 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes identifiziert.

Bei der Betrachtung des Klimaszenarios 2100 kann keine große Abweichung vom Ausgangsszenario ($\text{Coll_W_m}^2 = 5,00 \text{ m}^2$ und $\text{Coll_C_m}^2 = 5,00 \text{ m}^2$) ermittelt werden. In der Ausgangssituation wurden 4943 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes dokumentiert. Durch

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

Anwendung der Optimierung wurden die Werte der entsprechenden Parameter nur geringfügig erhöht. Die Kollektorfläche steigt von $5,00 \text{ m}^2$ auf $5,21 \text{ m}^2$. Die Absorberfläche steigt von $5,00 \text{ m}^2$ auf $5,19 \text{ m}^2$. Dies führt bereits zu einer Erhöhung der Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes auf 5151 Stunden (+ 4,21%).

8.4.2 Optimierung Variation interner Lasten

In Anlehnung an die Betrachtung des Ergebnisraums bei variierenden Klimaszenarien wird nachfolgend der Ergebnisraum bei der Variation der internen Lasten betrachtet (vgl. Abbildung 8.15). Auch hier ist in beiden Szenarien (70 W und 140 W) erkennbar, dass die Variation des Parameters Coll_W_m2 einen deutlich größeren Einfluss auf die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes aufweist als der Parameter Coll_C_m2. So nimmt beispielsweise die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes bei einer konstant gehaltenen Absorberfläche von $10,00 \text{ m}^2$ und variierender Kollektorfläche in Variante 70 W von 3790 auf 6425 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes zu (+ 69,5 %). Auf der anderen Seite nimmt bei einer konstanten Kollektorfläche von $10,00 \text{ m}^2$ und variierender Absorberfläche die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes um + 6,3 % von 3566 auf 3790 Stunden zu.

Bei dem Vergleich beider Ergebnisräume sind keine großen Abweichungen zwischen den Ergebnisflächen erkennbar. Der Einfluss der internen Lasten hat in diese Betrachtung nur einen geringen Beitrag zur Heiz- und Kühllast im Vergleich zu den weiteren betrachteten Szenarien (Variation Klima, Variation raumluftechnische Anlagen).

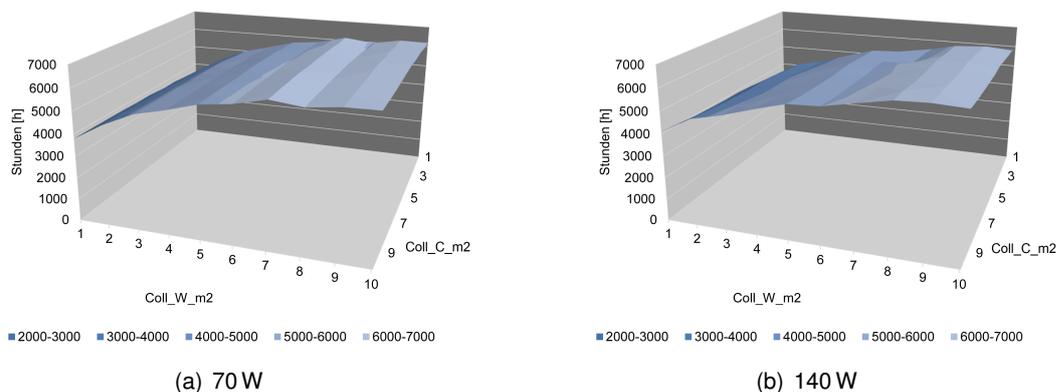


Abbildung 8.15: Dreidimensionaler Ergebnisraum der Variation interner Lasten: 70 W (a) und 140 W (b)

In Tabelle 8.2 werden die Ergebnisse des Optimierungsverfahrens für die Variation der Nutzung dargestellt. In beiden Szenarien konnten mithilfe des Optimierungsverfahrens bessere Ergebnisse erzielt werden. Für das Szenario 70 W ergibt sich eine Steigerung von 5884 auf 6519 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Dies entspricht einer Erhöhung der Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes um 10,79 % (Szenario 140 W: + 3,71 %).

Tabelle 8.2: Resultate des Optimierungsverfahrens bei der Variation der internen Lasten

Parameter	Ergebnis 70 W	Ergebnis 140 W
Coll_W_m2	7,95 m ²	5,03 m ²
Coll_C_m2	6,14 m ²	8,86 m ²
Anzahl Stunden	6519	5947

Durch Variation der internen Lasten sind bei den beiden betrachteten Szenarien gegenläufige Ergebnisse zu finden. Bei geringen internen Lasten (70 W) ist der benötigte Flächenbedarf der Kollektoren höher als die Fläche des Absorbers. Mit steigenden internen Lasten dreht sich dieses Verhältnis um. Bedingt durch die höhere Wärmeabgabe der technischen Installationen (PC + Monitor) verschiebt sich der Fokus der Anlagentechnik weg von der Dominanz des Heizens hin zu steigenden Kühllasten innerhalb des Gebäudes.

8.4.3 Optimierung Variation raumluftechnischer Anlagen

Die Ergebnisräume bei Variation der raumluftechnischen Anlagen zeigen ein vergleichbares Bild wie die vorangegangenen Betrachtungen. Mit Anstieg des Parameters Coll_W_m2 steigt der Output und somit die Anzahl an Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes aus der Simulation an. Je höher die Luftwechselrate, desto mehr Stunden des Jahres befinden sich innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Abbildung 8.16 verdeutlicht die Ergebnisräume bei einer Luftwechselrate von 0,2 h⁻¹ und 1,0 h⁻¹. Bei einem konstanten Zuluftvolumenstrom von 20 °C übernimmt die Lüftung mit steigendem Volumenstrom immer mehr die Beheizung bzw. Kühlung des Raumes. Hierdurch wird der Raum im Winter zusätzlich zur Fußbodenheizung geheizt und im Sommer neben der Deckenkühlung gekühlt. Daraus resultiert eine gleichmäßigere Ergebnisfläche, wie sie in Abbildung 8.16 (b) zu sehen ist.

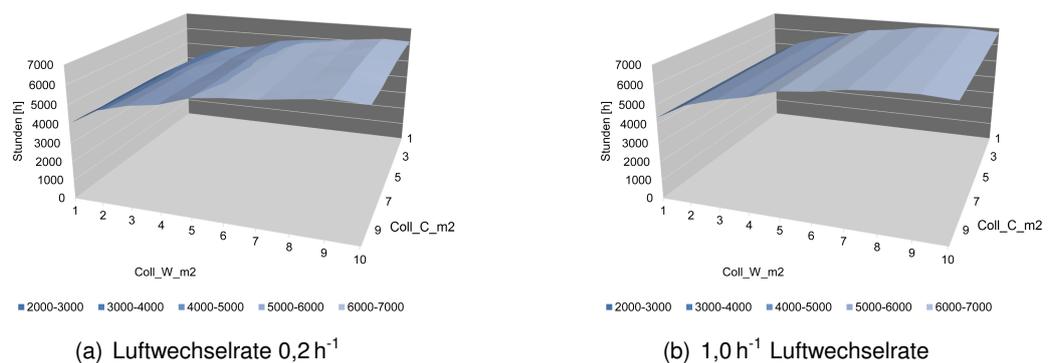


Abbildung 8.16: Dreidimensionaler Ergebnisraum der raumluftechnischen Anlagen: Luftwechselrate 0,2 h⁻¹ (a) und Luftwechselrate 1,0 h⁻¹ (b)

Tabelle 8.3 zeigt die Resultate der optimierten Varianten der raumluftechnischen Anlagen mit den Luftwechselraten 0,2 h⁻¹ und 1,0 h⁻¹. Auch hier ist eine Abweichung von den Ausgangssituationen erkennbar (Coll_W_m2 = 5,00 m² und Coll_C_m2 = 5,00 m²). Bei einer Luft-

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

wechselrate von $0,2 \text{ h}^{-1}$ erhöhen sich die Stunden von 5923 auf 6261 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes (+ 5,70 %). Mit Erhöhung auf $1,0 \text{ h}^{-1}$ kann eine Verbesserung von 10,04 % erzielt werden (Erhöhung von 6337 auf 6973 Stunden).

Tabelle 8.3: Resultate des Optimierungsverfahrens bei der Variation der raumluftechnischen Anlagen

Parameter	Ergebnis $0,2 \text{ h}^{-1}$	Ergebnis $1,0 \text{ h}^{-1}$
Coll_W_m2	6,95 m ²	7,9 m ²
Coll_C_m2	5,89 m ²	4,29 m ²
Anzahl Stunden	6261	6973

Auffällig ist, dass mit einer Erhöhung der Luftwechselrate die Kollektorfläche (Parameter Coll_W_m2) steigt und gleichzeitig die Absorberfläche (Parameter Coll_C_m2) sinkt. Dies kann so interpretiert werden, dass mit steigendem Luftwechsel der Raum mithilfe der raumluftechnischen Anlagen im Sommerfall gekühlt wird. Dadurch wird eine geringere Absorberfläche benötigt. Im Heizfall hingegen wird dem Raum über die raumluftechnischen Installationen mehr Wärme entzogen als hinzugefügt. Dadurch muss die Fußbodenheizung mehr Wärme zur Verfügung stellen, was sich in einer größeren Kollektorfläche widerspiegelt.

8.5 Optimierung aller Parameter

Nachdem im vorangegangenen Unterkapitel nur die beiden Parameter mit dem größten Einfluss optimiert wurden, wird in diesem Kapitel eine Optimierung aller Parameter durchgeführt. Dies kann durch die gewählten Intervalle der einzelnen Parameter zu stark von der Normung abweichenden Ergebnissen führen. Auch hier wird nach einem stochastischen Verfahren ein deterministisches Verfahren angewandt.

Folgende Randbedingungen werden dieser Betrachtung zugrunde gelegt:

- Optimierung von 8 Parametern entsprechend den Angaben aus Tabelle 7.3 auf Seite 71
- interne Lasten: 140 W (PC + Monitor)
- keine künstliche Beleuchtung
- keine raumluftechnischen Installationen
- Klimaszenario 2018

Nachfolgende Tabelle 8.4 zeigt die Resultate, die nach der Optimierung je Parameter ausgegeben wurden. Hierbei handelt es sich um die Ergebnisse nach Durchführung der stochastischen Optimierung. Gegenüber der Ausgangssituation lassen sich teils starke Abweichungen (vgl. bspw. Parameter V_Stor_W) der einzelnen Parameter erkennen. Dennoch befinden sich 6648 Stunden des betrachteten Simulationszeitraums von einem Jahr innerhalb des

Behaglichkeitsbandes. Die Ausgangssituation liefert lediglich 5747 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes. Dadurch kann ein Anstieg um 15,68 % verzeichnet werden.

Da in dieser Betrachtung keine raumluftechnischen Installationen zu Einsatz kommen, werden niedrigere Resultate als bei der Optimierung und Variation der raumluftechnischen Anlagen erzielt.

Tabelle 8.4: Gegenüberstellung der Ausgangssituation und der Ergebnisse der deterministischen Optimierung je Parameter

Parameter	Ausgangssituation	Ergebnis der stochastischen Optimierung
V_STOR_W	1,00 m ³	8,06 m ³
V_STOR_C	1,00 m ³	6,81 m ³
Coll_W_m2	5,00 m ²	9,94 m ²
Coll_C_m2	5,00 m ²	7,88 m ²
P_C_W_MFLOW	500 kg/h	151,52 kg/h
P_C_C_MFLOW	300 kg/h	450,90 kg/h
P_FH_MFLOW	100 kg/h	384,20 kg/h
P_CC_MFLOW	100 kg/h	484,07 kg/h

Es ist gut erkennbar, dass mit steigenden Kollektorflächen und steigenden Speichervolumina höhere Resultate erzielt werden können. Jedoch sind die Abweichungen von den Werten der Ausgangssituation extrem. So steigt das Tankvolumen des Parameters V_Stor_W um das achtfache an. Der Mehraufwand zur Umsetzung sowie der benötigte Platzbedarf führen zu höheren Investitionskosten, weshalb an dieser Stelle weiterführende Kosten-Nutzen-Analysen nötig wären. Dies ist jedoch nicht Teil der vorliegenden Untersuchung.

Um das absolute Optimum numerisch ermitteln zu können, wird ausgehend von den Ergebnissen des stochastischen Verfahrens ein deterministisches Verfahren durchgeführt. Die Resultate können Tabelle 8.5 entnommen werden. Die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes kann von 6648 (Resultat der stochastischen Optimierung) auf 6918 Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes erhöht werden. Dies entspricht einer weiteren Steigerung von 4,06 % Tabelle 8.5 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden durchgeführten Verfahren (stochastisch und deterministisch).

Tabelle 8.5: Gegenüberstellung der Ergebnisse der deterministischen und der stochastischen Optimierung je Parameter

Parameter	Ergebnis der stochastischen Optimierung	Ergebnis der deterministischen Optimierung
V_STOR_W	8,06 m ³	3,69 m ³
V_STOR_C	6,81 m ³	5,89 m ³
Coll_W_m2	9,94 m ²	9,58 m ²
Coll_C_m2	7,88 m ²	6,31 m ²
P_C_W_MFLOW	151,52 kg/h	197,5 kg/h
P_C_C_MFLOW	450,90 kg/h	340 kg/h
P_FH_MFLOW	384,20 kg/h	230 kg/h
P_CC_MFLOW	484,07 kg/h	430 kg/h

Auch hier ergeben sich in beiden Betrachtungen erhebliche Abweichungen der einzelnen Parameter gegenüber der Ausgangssituation (vgl. Tabelle 8.4). Die größte Abweichung ist bei Parameter V_STOR_W erkennbar. Hier reduziert sich das Tankvolumen von 8,06 m² auf 3,69 m². Die Schwierigkeit liegt in den Wechselwirkungen der einzelnen Parameter untereinander. Ein großer thermischer Speicher kann zu einer geringeren Kollektorfläche führen und umgekehrt. Ebenso passen sich die Massenströme der Pumpen entsprechend dem vorhandenen Speichervolumen an.

Betrachtet man die Darstellungen der operativen Raumtemperatur über der Außentemperatur, wird ersichtlich, wie sich die operative Raumtemperatur durch Variation der Parameter ändert. Abbildung 8.17 zeigt die Resultate der Ausgangssituation. Ein Großteil der Stunden eines Jahres befindet sich bereits innerhalb des Behaglichkeitsbandes (65,61 %). Es ist gut erkennbar, dass bei niedrigen Außentemperaturen das Anlagenkonzept nicht in der Lage ist, durchgängig für ein behagliches Innenraumklima zu sorgen.

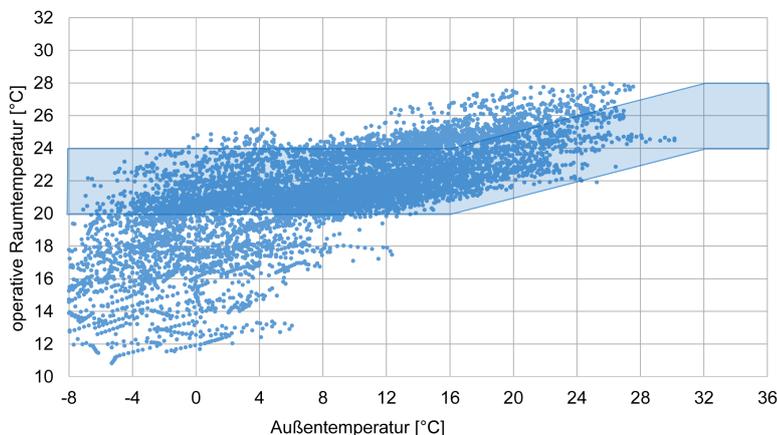


Abbildung 8.17: Darstellung der operativen Raumtemperatur über der Außentemperatur für die Ausgangssituation

Nach Durchführung der Optimierungen kann eine Erhöhung der Anzahl an Stunden pro Jahr innerhalb des Behaglichkeitsbandes festgestellt werden (78,97%). Abbildung 8.18 zeigt die Resultate des optimierten Anlagekonzepts. Die Änderungen in Relation zur Ausgangssituation sind gut erkennbar (die Punktwolke hat sich vermehrt in das Behaglichkeitsband geschoben), jedoch ist ein erheblicher Mehraufwand für die technischen Installationen nötig. Die Kollektorfläche steigt nach der Optimierung von 5 m^2 auf fast 10 m^2 an und erreicht somit die Grenzen des definierten Intervalls. Es wird deutlich, dass die Kollektor- und Absorberflächen einen erheblichen Einfluss auf die Outputs der Simulation haben. Die Überdimensionierung einzelner Anlagenkomponenten (z.B. Kollektor- und Absorberfläche) führt in diesem Fall jedoch nicht zu einem effizienteren und wirtschaftlicheren Anlagenbetrieb.

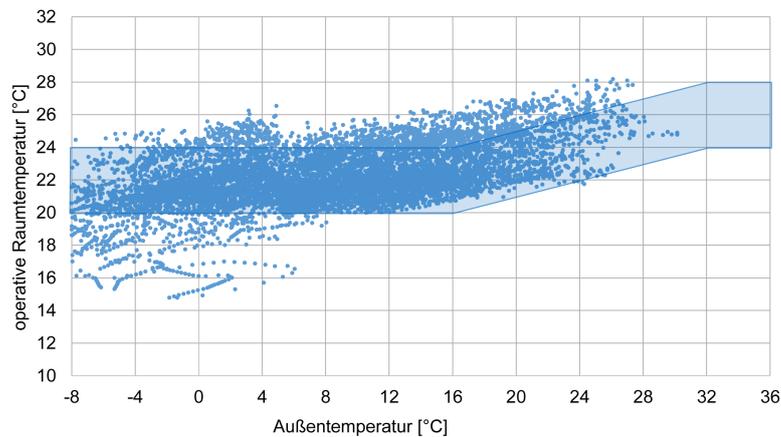


Abbildung 8.18: Darstellung der operativen Raumtemperatur über der Außentemperatur für die Optimierung aller Parameter

Auf Basis dieser Erkenntnis wird die Luftwechselrate innerhalb des optimierten Anlagekonzepts auf $1,0 \text{ h}^{-1}$ angehoben. Abbildung 8.19 zeigt die Resultate nach einem weiteren Optimierungsverfahren analog zu dem oben beschriebenen Optimierungsverfahren. Es wird deutlich, dass sich die Punktwolke vermehrt innerhalb des Behaglichkeitsbandes befindet. Die Luftwechselrate hat einen größeren Einfluss auf Resultate als einzelne Anlagenkomponenten und die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes kann auf 7455 Stunden (85,10%) erhöht werden.

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

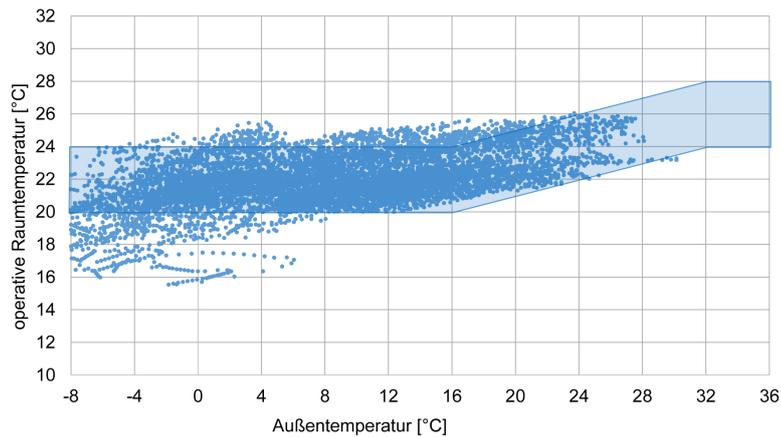


Abbildung 8.19: Darstellung der operativen Raumtemperatur über der Außentemperatur nach Optimierung aller Parameter und Erhöhung der Luftwechselrate auf $1,0 \text{ h}^{-1}$

Diese Betrachtung hat gezeigt, dass es viele Parameterzusammenstellungen gibt, die zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Die Abschätzung, welche Kombination sinnvoll ist, liegt in der Verantwortung des Planers.

Die Resultate zeigen, dass die Intervalle der Parameter gut gewählt wurden und sich nur ein Parameter (Coll_W_m2) an die Maximalgrenze des Intervalls bewegt hat. Dies ist an den Resultaten der Optimierung gut erkennbar (vgl. Abbildung 8.20 und Tabelle 8.5). Alle Verläufe innerhalb dieser Darstellung repräsentieren einen Parameter. Durch unterschiedliche Konstellationen der einzelnen Parameter wird ein Optimum gesucht, dass sich idealerweise dem Maximalwert von 8760 Stunden pro Jahr innerhalb des Behaglichkeitsbandes annähert. Über die Anzahl an Simulationen (x-Achse) nähern sich die Parameter je einem Wert nach und nach an. Der rote Verlauf visualisiert hierbei den Output der Zielfunktion (Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes). Es ist gut erkennbar, dass sich die Parameter innerhalb ihres definierten Intervalls (obere und untere Grenze der Darstellung) einem Zielwert annähern. Lediglich der Parameter Coll_W_m2 stößt an die Grenzen seines Intervalls. Ersichtlich wird dies durch den grünen Verlauf am oberen Ende der Darstellung.

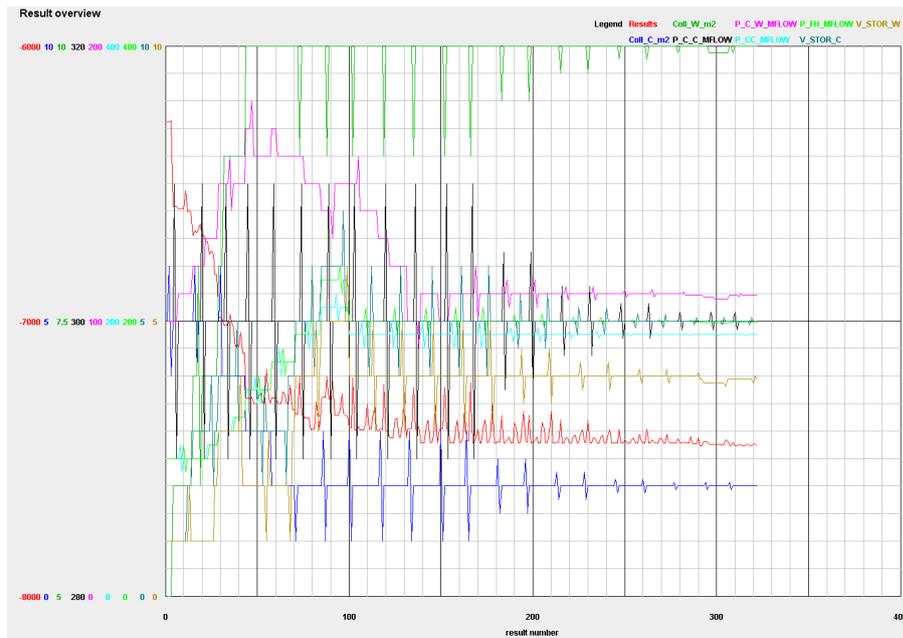


Abbildung 8.20: Darstellung der Optimierungsergebnisse

Um dem Parameter Coll_W_m2 ein eindeutiges Resultat zuzuordnen zu können, wird der Optimierungsvorgang wiederholt. Das Intervall des Parameters wird von 1,0 - 10,0 m² auf 1,0 - 20,0 m² erweitert. Die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes kann erneut angegeben werden. Es befinden sich 89,17% der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes (7811 Stunden). Bei Betrachtung der Abbildungen 8.19 und 8.22 ist gut erkennbar, dass die Stunden unterhalb des Behaglichkeitsbandes nochmals deutlich reduziert werden konnten.

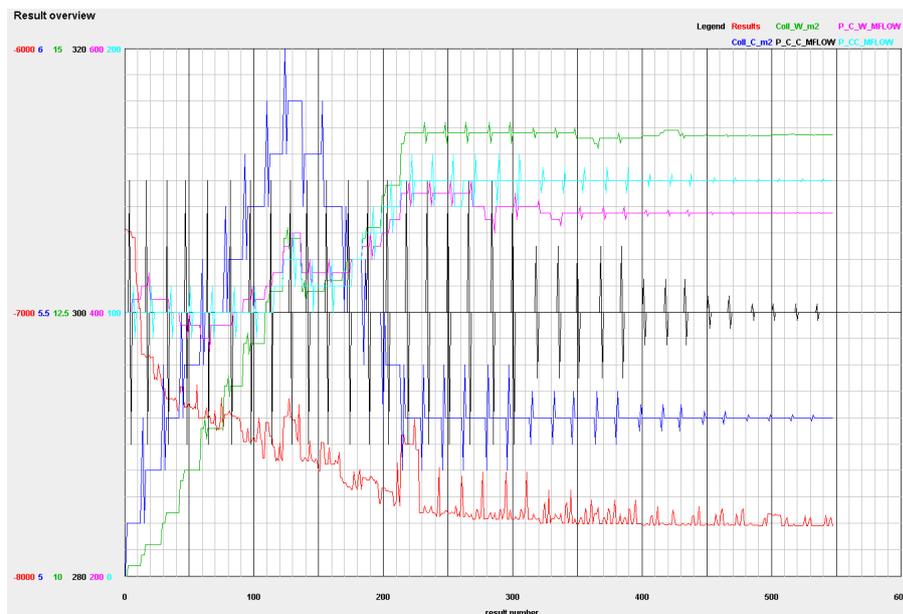


Abbildung 8.21: Darstellung der Optimierungsergebnisse

8 Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells

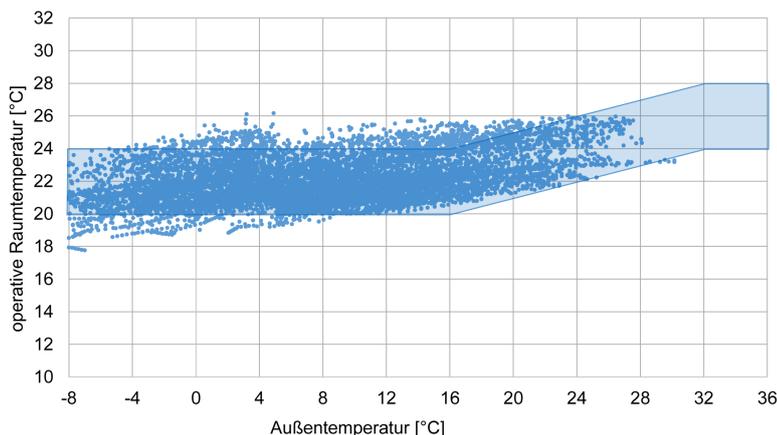


Abbildung 8.22: Darstellung der operativen Raumtemperatur über der Außentemperatur nach Optimierung aller Parameter mit weiterem Intervall und einer Luftwechselrate von $1,0\text{ h}^{-1}$

Tabelle 8.6 gibt die Simulationoutputs des vorangegangenen Optimierungsvorgangs wieder. Es ist gut erkennbar, dass sich lediglich der Parameter Coll_W_m2 über die ursprünglich angegebene Intervallgrenze hinaus bewegt.

Tabelle 8.6: Simulationoutputs je Parameter nach abschließendem Optimierungsvorgang

Parameter	Ergebnis der stochastischen Optimierung
V_STOR_W	4,0 m ³
V_STOR_C	2,5 m ³
Coll_W_m2	14,18 m ²
Coll_C_m2	5,31 m ²
P_C_W_MFLOW	475,00 kg/h
P_C_C_MFLOW	300,00 kg/h
P_FH_MFLOW	189,37 kg/h
P_CC_MFLOW	150,00 kg/h

8.6 Übertragbarkeit und Anwendung des Vorgehens

In den Simulationen wurde gezeigt, dass das Vorgehen klar definieren kann, welche Parameter den größten Einfluss auf den Simulationoutput haben. In allen betrachteten Varianten wurde deutlich, dass die Variation der Kollektorfläche sowie der Absorberfläche den größten Einfluss auf die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes haben. Dennoch stellt sich die Frage, inwieweit das beschriebene Vorgehen auf andere Modelle übertragen werden kann.

Grundsätzlich sei festgehalten, dass die *Screening*-Methode nach Morris ein leicht handhabbares Vorgehen darstellt und auf jegliche Anlagen- und Gebäudekonzepte übertragbar ist. Die Kombination aus der Morris-Methode mit Parameteranalysen in der gebäude- und

anlagentechnischen Simulation ist durchaus sinnvoll, um möglichst viele Erkenntnisse über das Gebäude und seine Anlagentechnik zu gewinnen sowie einflussreiche Parameter auf den Simulationsoutput frühzeitig zu identifizieren. Die anschließenden Optimierungsverfahren sind ebenfalls auf andere Anlagen- und Gebäudekonzepte übertragbar. Allerdings steht hierbei die aufgestellte Zielfunktion im Fokus. Zielfunktionen, die lediglich eine Zielgröße verfolgen (in diesem Fall die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes) bieten eine gute Grundlage für weiterführende Betrachtungen (z. B. Einfluss von Umweltwirkungen, Betriebskosten, etc.).

Ausschlaggebend für belastbare Ergebnisse sind realitätsnahe Randbedingungen innerhalb der Simulationsumgebung, die es erlauben Rückschlüsse auf das geplante Anlagen- und Gebäudekonzept zu schließen. Durch Betrachtung der Abweichungen von der aktuellen Normung (Variation einzelner Parameter) sowie Abweichungen von klimatischen Randbedingungen (variierende Klimaszenarien) können Anlagenkonzepte so dimensioniert werden, dass sie zukünftigen klimatischen Änderungen standhalten können. In dieser Betrachtung wurde gezeigt, dass bei Variation des Klimas, der internen Lasten und der raumluftechnischen Anlagen stets belastbare Ergebnisse erzielt werden konnten.

Bei der Planung von Anlagen- und Gebäudekonzepten sollte das beschriebene Vorgehen stets Anwendung finden, da es zu einem besseren Verständnis des Zusammenwirkens der einzelnen Anlagenkomponenten führt und die energieverbrauchenden Prozesse bereits in den ersten Leistungsphasen individuell angepasst werden können. Diese Erkenntnisse können somit rechtzeitig in bestehende Konzepte integriert werden und führen dadurch zu einem effizienteren Planungsprozess, zu einer Erhöhung der thermischen Behaglichkeit im Innenraum und tragen zu einem klimaneutralen Gebäudebestand bei.

8.7 Kurzzusammenfassung

Bei der Betrachtung des adaptiven Simulationsmodells wird anhand der Sensitivitätsanalysen deutlich, dass bei allen Variantenuntersuchungen die Parameter `Coll_W_m2` und `Coll_C_m2` als einflussreichste Parameter auf den Simulationsoutput identifiziert wurden. Die Optimierungsverfahren dieser Parameter liefern in allen Betrachtungen das globale Optimum. Dies übersteigt die Ausgangssituation teils deutlich, führt aber zu einem behaglicheren Innenraumklima (gemessen an der Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes). Darüber hinaus ist erkennbar, dass die raumluftechnischen Anlagen einen erheblichen Einfluss auf die Resultate haben.

Das beschriebene Vorgehen liefert belastbare Ergebnisse und ist auf variierende Gebäude- und Anlagenkonzepte übertragbar.

9 Fazit

9.1 Verifizierung der Forschungshypothese

Die aufgestellte Forschungshypothese lautet:

Durch Anwendung von Sensitivitätsanalysen und Optimierungswerkzeugen lässt sich die Dimensionierung der Anlagentechnik verbessern, sodass eine energieeffiziente und thermisch-regenerative Konditionierung des Innenraums realisiert werden kann.

Die aufgestellte Forschungshypothese kann verifiziert werden. In den ersten Leistungsphasen können durch den Einsatz von Sensitivitätsanalysen und Optimierungsverfahren mehr Erkenntnisse über die Anlagen- und Gebäudetechnik gewonnen werden als mit bisherigen Planungsmethoden. Diese Erkenntnisse können rechtzeitig in den laufenden Planungsprozess integriert werden und schaffen dadurch monetäre Vorteile. Der Einsatz von regenerativen Energien kann frühzeitig abgeschätzt und optimiert werden und fördert dadurch das Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestands. Die erfolgreiche Umsetzung des vorgestellten Verfahrens hängt dabei von der definierten Zielfunktion ab. Hierbei ist zu empfehlen, *single objective optimization*-Verfahren anzuwenden, da lediglich nach einer Zielgröße optimiert wird und somit nicht zu sich widersprechenden Resultaten führt.

Die Planungsschritte zur Realisierung eines klimaneutralen Gebäudebetriebs können mithilfe von SA und Optimierungsverfahren unterstützt werden. Sie bieten die Möglichkeit, Varianten- und Parameterstudien durchzuführen. Dadurch erlauben sie eine Betrachtungsweise über den aktuellen Stand der Technik hinaus. Die Stellschrauben zu einem klimaneutralen Gebäudebestand werden hiermit schnell ermittelt.

9.2 Einordnung in den Stand des Wissens

Sowohl in Forschung wie auch in der Technik werden Optimierungsverfahren in unterschiedlichen Fachdisziplinen in erster Linie angewandt, um numerische Sachverhalte schnell zu lösen, aber auch um ein optimales Zusammenwirken einzelner Parameter zu identifizieren. Der aktuelle Stand des Wissens wird in der Gebäude- und Anlagensimulation nur in geringem Umfang eingesetzt, obwohl dadurch erhebliche Zeit- und Kosteneinsparungen möglich sind. Diese Arbeit reiht sich ein in eine Auswahl von Untersuchungen zur energetischen Gebäudesimulation unter Verwendung von Optimierungsverfahren (vgl. Kapitel 6).

9 Fazit

Banos et al. haben in einem Review gezeigt, dass die Forschung zu heuristischen Verfahren tendiert. Das Ziel ist es hierbei, mit einem vereinfachten Modell und begrenztem Wissen zeitsparend belastbare Ergebnisse zu generieren. Jedoch führen viele Unsicherheiten der Inputs zu einem weiten Ergebnisraum der Outputs. Dies kann durch das beschriebene Vorgehen eingeschränkt und zeitsparend realisiert werden.

Iqbal et al. haben Optimierungsvorgänge in vier Bereiche unterteilt: Input, Output, Zielfunktion und Randbedingungen. Die Inputs bewegen sich in einem vorab definierten Intervall und beeinflussen den Output einer Simulation. Die Randbedingungen (in vorliegender Arbeit der Untersuchungsgegenstand) werden dabei konstant gehalten. Der Erfolg über eine gute Optimierung hängt von der geeigneten Wahl der Zielfunktion ab. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Fokus unter anderem auf die sinnvolle Wahl der Zielfunktion gelegt. Hier zeigte sich, dass durch dieses Vorgehen belastbarere Ergebnisse generiert werden können.

Die Arbeiten von Michael Wetter, Jonathan Wright und Elijah Polak beschäftigen sich mit der Bedeutung der Optimierungsalgorithmen. Sie kombinieren stochastische und deterministische Verfahren, um schneller an optimierte Resultate zu gelangen. Dieses Vorgehen wurde in dieser Arbeit ebenfalls angewandt. Da jedoch von einer stetigen Zielfunktion ausgegangen wurde, liefert eine deterministische Optimierung bereits das exakte Optimum. Durch Kombination beider Verfahren konnte eine Zeitersparnis erreicht werden.

Die vorliegende Arbeit verdeutlicht, dass der Einsatz von SA und Optimierungsverfahren zur frühzeitigen Abschätzung von gebäudetechnischen Anlagen dient. Jedoch muss vorab das Ziel dieses Vorgehens festgelegt werden. Das Verständnis über die Zielfunktion sowie über die deterministischen und stochastischen Optimierungsalgorithmen muss stets vorhanden sein. Die Arbeit demonstriert eine *single-objective optimization* mit einer von der Zeit abhängigen Zielfunktion. Bedingt durch die Tatsache, dass zu jedem Zeitpunkt exakt eine Außentemperatur und eine operative Raumtemperatur vorliegen, ist die Zielfunktion stetig. Einige der betrachteten Studien verfolgen *multi-objective optimization*, d.h. sie versuchen zeitgleich mehrere Fragestellungen (Zielfunktionen) zu optimieren (z. B. Heizenergiebedarf und Umweltwirkungen). Dadurch können keine klaren Aussagen über den Verlauf der Zielfunktion getroffen werden und ein eindeutiges Auffinden eines Optimums wird unwahrscheinlicher. Im ungünstigsten Fall, wie es Delgarm et al. gezeigt haben, führen mehrere Zielfunktionen bei einzelner Betrachtung der Zielfunktion zu widersprüchlichen Resultaten.

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass die Kopplung von Fachdisziplinen zeitliche und daraus folgend monetäre Vorteile bietet. Die Lösung von gebäudetechnischen Fragestellungen über mathematische Problemstellungen und die daraus resultierende energetisch optimierte Anlagentechnik beinhaltet weiteres Forschungspotential. Darüber hinaus sollte versucht werden, die theoretischen Erkenntnisse in die laufende Praxis zu integrieren. [58] [96] [50] [47]

Das beschriebene Vorgehen bietet den Vorteil, dass sie auf jegliche Gebäude- und Anlagenkonzepte übertragbar ist.

9.3 Erkenntnisse aus dem Untersuchungsgegenstand

9.4 Schlussfolgerung und Ausblick

Diese Untersuchung zeigt, dass sowohl die Kollektorfläche, als auch die Absorberfläche in allen Varianten als einflussreichste Parameter auf den Simulationsoutput (Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes) identifiziert werden konnten. Dadurch wird die Abhängigkeit des Anlagenkonzepts von den wärme- bzw. kälteversorgenden Komponenten bei variierenden Randbedingungen ersichtlich. Je größer die Kollektorfläche, desto höher ist demnach die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes bei niedrigen Außentemperaturen. Bei hohen Außentemperaturen spielt die Größe der Absorberfläche eine dominierende Rolle. Die Variation der Massenströme der betrachteten Pumpen hat im Vergleich zu den restlichen Parametern einen geringen Einfluss auf die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes.

Bei der Betrachtung unterschiedlicher Klimaszenarien wird deutlich, dass aktuelle Planungsgrundlagen für das gegenwärtige Klima ausreichend sind. Bei Änderung des Klimas werden allerdings geringere Stundenanzahlen innerhalb des Behaglichkeitsbandes bei gleicher Dimensionierung erzielt. Daraus folgt, dass sich zukünftig die Planungsgrundlagen und Normungen an die klimatischen Änderungen anpassen müssen.

Die Variation interner Lasten ergibt, dass mit einer höheren technischen Installation (interne Lasten bis 140 W) nur geringe Abweichungen auf die Simulationsergebnisse zu beobachten sind. Dadurch hat die Gebäudenutzung im Vergleich zu den klimatischen Veränderungen nur einen geringen Einfluss auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes.

Darüber hinaus konnten die raumluftechnischen Anlagen (in Form von variierenden Luftwechselraten) als einflussreichste Randbedingung innerhalb der betrachteten Szenarien ermittelt werden. Mit steigender Luftwechselrate kann die Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes deutlich erhöht und somit die Behaglichkeit im Innenraum merklich verbessert werden. Da in dieser Betrachtung von konstanten Zulufttemperaturen ausgegangen wird, unterstützen die raumluftechnischen Installationen die Fußbodenheizung im Heizfall sowie die Deckenkühlung im Kühlfall. Je höher die Luftwechselrate, desto größer der Einfluss auf das Heiz- bzw. Kühlsystem.

Ebenfalls konnte gezeigt werden, dass die Reduzierung einzelner Anlagenkomponenten teilweise sogar zu einem Anstieg der Stundenanzahl innerhalb des Behaglichkeitsbandes geführt hat. Beispielsweise können durch Reduzierung des kalten thermischen Speichervolumens in nahezu allen betrachteten Varianten gleichbleibende, wenn nicht steigende Stundenanzahlen erzielt werden.

Weiteres Forschungspotential dieser Arbeit stellt die Übertragung des Vorgehens auf variierende Gebäude- und Anlagenkonzepte mit Fokus auf eine regenerative und klimaneutrale Wärme- und Kälteversorgung von Gebäuden dar. Darüber hinaus hat die Anlagendimensionierung einen wesentlichen Einfluss auf die zu erwartenden Kosten eines Bauvorhabens. Im Rahmen dieser Arbeit wurden jegliche Kosten nicht weiter betrachtet und bieten dadurch Potential

für weitere Untersuchungen. Dabei kann die Gegenüberstellung von Kosten-Nutzen- und Kosten-Aufwands-Analysen eine wichtige Rolle spielen.

9.5 Kritische Betrachtung

Es wurden im Rahmen dieser Arbeit einige Vereinfachungen und Annahmen getroffen, die im Folgenden kurz aufgelistet werden. Diese Annahmen wurden bewusst getroffen, um die Vorgehensweise in den Vordergrund zu stellen.

Untersuchungsgegenstand

Der Untersuchungsgegenstand ist klar abgrenzbar, da der Fokus auf der Anlagentechnik sowie der Arbeitsweise liegt. Weiter verfolgt werden sollte die Übertragung auf ein Gesamtgebäude und die Betrachtung unterschiedlicher Nutzungen.

Bedingt durch die guten thermischen Eigenschaften wurde in dieser Betrachtung Beton als gut geeignetes Material für die thermische Außenhülle des Gebäudes angesehen, um für eine gewisse Trägheit und einen positiven Beitrag zum Lastmanagement im System zu sorgen. Aus ökologischer Sicht sollte Beton – bedingt durch einen hohen nichterneuerbaren Primärenergieaufwand, sowie eines hohen Global Warming Potentials – vermieden werden und auf ökologischere Bauteile, wie z.B. Holz, zurückgegriffen werden.

Raumluftechnik

In dieser Betrachtung wurde die Luftwechselrate bzw. der Luftaustausch so geregelt, dass lediglich bei Anwesenheit des Nutzers die Lüftungstechnischen Anlagen in Betrieb sind. Es wurde gezeigt, dass eine höhere Luftwechselrate zu einem höheren thermischen Komfort im Innenraum führt. Dieser kann weiter erhöht werden, wenn die raumluftechnischen Anlagen auch bei Abwesenheit des Nutzer betrieben werden. Hier stehen jedoch ökologische und ökonomische Gesichtspunkte im Vordergrund, weshalb nur ein Betrieb während der Anwesenheit des Nutzers betrachtet wurde.

Regelung der Anlagentechnik

Der Heiz- und Kühlbetrieb des Gebäudes sind in Abhängigkeit der gemittelten Außentemperatur geregelt. Bei Unterschreiten der Heizgrenze von 15 °C wird das Heizen freigegeben, bei Überschreiten dieser Grenze wird die Kühlung des Gebäudes freigegeben. Da es in den Übergangsmonaten zu einem raschen Hin- und Herschalten der Anlagen kommen kann, sollte an dieser Stelle ein $\Delta T = 3 \text{ K}$ eingearbeitet werden, um dieses schnelle Takten der Pumpen zu vermeiden.

„Wenn die Heizlast immer geringer wird, ist zu überlegen, ob sich der Aufwand für eine Warmwasserheizung lohnt, zumal in Nullemissionshäusern die Wärmerückgewinnung obligatorisch ist und sie nur mit Lüftungssystem möglich ist.“ [33]

9.6 Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschreibt ein auf regenerativen Energien basierendes Anlagenkonzept das Anhand eines Gebäudemodells und die Anwendung von Optimierungsverfahren variierenden Szenarien ausgesetzt und untersucht wird. Für das Gebäudemodell wird ein Niedrigstenergiestandard angenommen, der zukünftigen Anforderungen entspricht. Das Ziel ist ein klimaneutraler Heiz- und Kühlbetrieb der gebäudetechnischen Anlagen und die Einhaltung der thermischen Behaglichkeit im Innenraum. Um die optimale Anlagendimensionierung zu identifizieren werden Optimierungsverfahren angewandt.

Der aktuelle Stand der Forschung verfolgt das Ziel, mit einer geringen Anzahl an Optimierungsschritten (Simulationsschritte) eine maximale Anzahl an Problemstellungen (Zielfunktionen) zu lösen. Dabei werden häufig sich widersprechende Zielfunktionen gegenübergestellt, die zu konträren Ergebnissen führen (vgl. hierzu Kapitel 6). Bei der Anwendung von Optimierungsverfahren ist die geeignete Wahl und das gezielte Aufstellen der Zielfunktion zur CFO entscheidend, ob ein absolutes Optimum innerhalb des Ergebnisraums ermittelt werden kann. Die im Rahmen dieser Arbeit aufgestellte Zielfunktion (vgl. Kapitel 7.4.1) stellt eine Abhängigkeit zwischen der operativen Raumtemperatur und der Außentemperatur dar und weist somit einen stetigen Verlauf auf. Dies erlaubt die Identifikation eines absoluten Extremwertes mit Hilfe deterministischer Optimierungsverfahren.

Diese Untersuchung zeigt, dass durch den Einsatz von Optimierungsverfahren gebäudetechnische Anlagen über den aktuellen Stand der Technik hinaus optimiert ausgelegt und dimensioniert werden können. Dies fördert den Einsatz von regenerativen Energien in energie- und versorgungstechnischen Anlagenkonzepten. Dabei muss das Ziel verfolgt werden, dass in Kombination mit einem geringeren technischen Aufwand der gleiche Innenraumkomfort, wie mit konventionellen Energieträgern geschaffen wird.

Darüber hinaus zeigt diese Untersuchung, dass das beschriebene klimaneutrale Heiz- und Kühlkonzept bei der Betrachtung der unterschiedlichen Szenarien funktionsfähig ist und im Wesentlichen von den Kollektor- und Absorberflächen abhängt. Die Summe der optimierten Anlagenflächen übersteigt, trotz optimaler Ausrichtung, die Grundfläche des Untersuchungsgegenstands. Für ein Energieversorgungskonzept, das auf Solar Heating und Radiative Cooling basiert, ist auf ausreichende Flächen zur Installation der Kollektor- und Absorberflächen zu achten.

Literatur

- [1] U. Eicker, *Solare Technologien für Gebäude: Grundlagen und Praxisbeispiele*, 2., vollst. überarb. Aufl., Ser. Vieweg + Teubner Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2012, ISBN: 978-3-8348-8237-0.
- [2] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz, *Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis*, 8., überarbeitete und aktualisierte Aufl., Ser. Vieweg Studium. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010, ISBN: 3834897612.
- [3] *Energiedaten: Gesamtausgabe*, abrufbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=34, 2018.
- [4] Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, *Gesetze im Internet*, Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Hrsg., Abrufbar unter www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/__1.html, 2017.
- [5] *Modernizing energy systems can reduce primary energy consumption in heating and cooling by up to 50% - UN report - United Nations Sustainable Development*, Abrufbar unter www.un.org/sustainabledevelopment/blog/2015/02/modernizing-energy-systems-can-reduce-primary-energy-consumption-in-heating-and-cooling-by-up-to-50-un-report/. (besucht am 22. 01. 2018).
- [6] Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik, *Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland: unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)*, Baden-Württemberg, 2012.
- [7] Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hrsg., *Effiziente Energienutzung in Bürogebäuden: Planungsleitfaden*, Augsburg, 2008.
- [8] B. Lenz, J. Schreiber und T. Stark, *Nachhaltige Gebäudetechnik: Grundlagen - Systeme - Konzepte*, Ser. DETAIL Green Books. München: DETAIL, 2010, ISBN: 978-3-955-53013-6.
- [9] bpb Bundeszentrale für politische Bildung, *Reale und nominale Lohnentwicklung*, Abrufbar unter <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61766/lohnentwicklung>, 2017.
- [10] Destatis Statistisches Bundesamt, *Preise - Daten zur Energiepreisentwicklung*, Destatis Statistisches Bundesamt, Hrsg., Wiesbaden, 2017.
- [11] K. Stierstadt, *Energiewende (Stierstadt): In Physik, Technik und Umwelt*. s.l.: Verlag Europa-Lehrmittel, 2015, ISBN: 978-3-8085-5780-8.

Literatur

- [12] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Hrsg., *Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*, Art.-Nr.: 9254, Chausseestraße 128 a, 10115 Berlin, 2018.
- [13] *Energieeinsparverordnung*. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2013.
- [14] Europäische Union, *Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates*, Straßburg, 2010.
- [15] H. Lund, "Renewable energy strategies for sustainable development", *Energy*, Jg. 32, Nr. 6, S. 912–919, 2007.
- [16] E. U. (EU), *Richtlinie (EU) 2018/844 des europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2010/31/EU über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden und der Richtlinie 2012/27/EU über Energieeffizienz: RICHTLINIE (EU) 2018/844*.
- [17] E. U. (EU), *Empfehlung (EU) 2016/1318 der Kommission vom 29. Juli 2016 über Leitlinien zur Förderung von Niedrigstenergiegebäuden und bewährten Verfahren, damit bis 2020 alle neuen Gebäude Niedrigstenergiegebäude sind*.
- [18] M. Keltsch, W. Lang und T. Auer, "Nearly Zero Energy Standard for Non-Residential Buildings with high Energy Demands—An Empirical Case Study Using the State-Related Properties of BAVARIA", *Buildings*, Jg. 7, Nr. 1, S. 25, 2017.
- [19] P. Institut, *Passivhaus Institut*, Abrufbar unter <http://www.passiv.de/>, 2018. (besucht am 15.01.2018).
- [20] T. Rössel, M. Fischer, J. Jungwirth und U. Wehmhörner, *Studie zu Potenzialen intelligenter Energiemanagementsysteme in Nichtwohngebäuden*, München, 2010.
- [21] S. Verbeke und A. Audenaert, "Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017.
- [22] A. Albert, Hrsg., *Bautabellen für Ingenieure: Mit Berechnungshinweisen und Beispielen*, 22. Auflage. Köln: Bundesanzeiger Verlag, 2016, ISBN: 978-3-8462-0660-7.
- [23] N. Aste, A. Angelotti und M. Buzzetti, "The influence of the external walls thermal inertia on the energy performance of well insulated buildings", *Energy and Buildings*, Jg. 41, Nr. 11, S. 1181–1187, 2009.
- [24] A. Reilly und O. Kinnane, "The impact of thermal mass on building energy consumption", *Applied Energy*, Jg. 198, S. 108–121, 2017.
- [25] C. Di Perna, F. Stazi, A. U. Casalena und M. D'Orazio, "Influence of the internal inertia of the building envelope on summertime comfort in buildings with high internal heat loads", *Energy and Buildings*, Jg. 43, Nr. 1, S. 200–206, 2011.
- [26] G. Hausladen, T. Auer, J. Schneegans, K. Klimke und H. Riemer, *Lastverhalten von Gebäuden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Bauweisen und technischer Systeme*, Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung, Hrsg., München, 2014.

- [27] Statistisches Bundesamt, "Bauen und Wohnen: Baugenehmigungen / Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach Art der Beheizung und Art der verwendeten Heizenergie, Lange Reihen ab 1980 - 2016", Nr. 5311001167004, S. 26–28, 2017. (besucht am 03.05.2018).
- [28] B. Weyres-Borchert und B.-R. Kasper, *Solare Wärme. Technik - Planung - Hausanlage*, Ser. BINE-Fachbuch. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2015, ISBN: 978-3-8167-9149-2.
- [29] J. Pfafferott, D. Kalz und R. Koenigsdorff, *Bauteilaktivierung. Einsatz - Praxiserfahrungen - Anforderungen*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2015, ISBN: 3816793576.
- [30] M. Sterner und I. Stadler, *Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, ISBN: 978-3-642-37379-4.
- [31] *Nachhaltige Energiesysteme*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009, ISBN: 978-3-8348-0742-7.
- [32] B. Diekmann und E. Rosenthal, *Energie*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014, ISBN: 978-3-658-00500-9.
- [33] M. Schmidt, *Auf dem Weg zum Nullemissionsgebäude*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, ISBN: 978-3-8348-1746-4.
- [34] F. Hartmann, "Flächenheizung und -kühlung: Teil 2 - Systeme, Wärme- und Kältebereitstellung", Jg. Bd. 68 (2017) Nr. 4-April, S. 17–22, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG.
- [35] F. Hartmann, "Flächenheizung und -kühlung: Teil 1 - Wechselwirkung Mensch und Raum", Jg. Bd. 68 (2017) Nr.3-März, S. 28–31, Springer-VDI-Verlag GmbH & Co. KG.
- [36] Deutsches Institut für Normung, *Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung*, Berlin, 2013.
- [37] Deutsches Institut für Normung, *Ergonomie der thermischen Umgebung - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit*, Berlin, 2005.
- [38] A. Wagner, *Photovoltaik Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, ISBN: 978-3-662-48639-9.
- [39] R. Zahoransky, H.-J. Allelein, E. Bollin, H. Oehler, U. Schelling und H. Schwarz, *Energietechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, ISBN: 978-3-8348-1869-0.
- [40] M. Kaltschmitt, *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*, 4. aktual. korr. u. ergänzte Aufl. Berlin: Springer, 2008, ISBN: 978-3-540-28204-4.
- [41] U. Eicker, *Solare Technologien für Gebäude*. Stuttgart: B.G. Teubner, 2001, ISBN: 3-519-05057-9.

Literatur

- [42] B. S. e.V., Hrsg., *Statistische Zahlen der deutschen Solarwärmebranche (Solarthermie): Jährlich neu installierte Kollektorfläche von Solarthermieanlagen in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2017 (in 1.000 Quadratmeter)*, 2018.
- [43] Bundesverband Solarwirtschaft e.V., Hrsg., *Neue Kollektorfläche von Solarthermieanlagen in Deutschland bis 2016 | Statistik*, 2016.
- [44] G. Reich und M. Reppich, *Regenerative Energietechnik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013, ISBN: 978-3-8348-0981-0.
- [45] Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW), Hrsg., *Energieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen*, 2018.
- [46] J. A. Duffie und W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2013, ISBN: 9781118671603.
- [47] S. Vall und A. Castell, "Radiative cooling as low-grade energy source: A literature review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 77, S. 803–820, 2017.
- [48] X. Sun, Y. Sun, Z. Zhou, M. A. Alam und P. Bermel, "Radiative sky cooling: Fundamental physics, materials, structures, and applications", *Nanophotonics*, Jg. 6, Nr. 5, S. 997–1015, 2017.
- [49] M. M. Hossain und M. Gu, "Radiative Cooling: Principles, Progress, and Potentials", *Advanced Science (Weinheim, Baden-Württemberg, Germany)*, Jg. 3, Nr. 7, 2016, 1500360.
- [50] C. G. Granqvist und A. Hjortsberg, "Radiative cooling to low temperatures: General considerations and application to selectively emitting SiO films", *Journal of Applied Physics*, Jg. 52, Nr. 6, S. 4205–4220, 1981.
- [51] F. Kurmann, *Kühlen mit dem Weltraum*, VDI Verlag GmbH, Hrsg., Düsseldorf, 2018.
- [52] A. P. Raman, M. A. Anoma, L. Zhu, E. Rephaeli und S. Fan, "Passive radiative cooling below ambient air temperature under direct sunlight", *Nature*, Jg. 515, Nr. 7528, S. 540–544, 2014.
- [53] E. Rephaeli, A. Raman und S. Fan, "Ultrabroadband photonic structures to achieve high-performance daytime radiative cooling", *Nano letters*, Jg. 13, Nr. 4, S. 1457–1461, 2013.
- [54] L. Zhu, A. Raman, K. X. Wang, M. A. Anoma und S. Fan, "Radiative cooling of solar cells", *Optica*, Jg. 1, Nr. 1, S. 32, 2014.
- [55] E. Erell und Y. Etzion, "Radiative cooling of buildings with flat-plate solar collectors", *Building and Environment*, Jg. 35, Nr. 4, S. 297–305, 2000.
- [56] X. Xu, R. Niu und G. Feng, "An Experimental and Analytical Study of a Radiative Cooling System with Flat Plate Collectors", *Procedia Engineering*, Jg. 121, S. 1574–1581, 2015.
- [57] J. Sima, O. Sikula, K. Kosutova und J. Plasek, "Theoretical Evaluation of Night Sky Cooling in the Czech Republic", *Energy Procedia*, Jg. 48, S. 645–653, 2014.

- [58] U. Eicker und A. Dalibard, "Photovoltaic–thermal collectors for night radiative cooling of buildings", *Solar Energy*, Jg. 85, Nr. 7, S. 1322–1335, 2011.
- [59] M. D. Morris, "Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments", *Technometrics*, Jg. 33, Nr. 2, S. 161, 1991.
- [60] M. Jones und S. Ledinger, "Pushing the limits of simulation complexity: A building energy performance simulation of an exhibition center in the U.A.E.", in *Simbuild 2010*, Bd. 4th Annual Conference of IBPSA-USA, August 11–13, 2010, New York, NY. (besucht am 06.06.2018).
- [61] S. A. Klein, J. A. Duffie und W. A. Beckman, "TRNSYS—a transient simulation program", *ASHRAE Transactions*, Jg. 01, Nr. 82, 1976.
- [62] M. Wetter, *GenOpt(R) Generic Optimization Program: User Manual Version 3.1.1*, U.S. Department of Energy, Hrsg., 2016.
- [63] J. Huber-Vatres, "Integrative Ansätze in der energetischen Gebäudesimulation auf den Modellskalen Einzelraum, Gebäude und Stadtquartier", Diss., Universität der Künste Berlin, Berlin, 2015.
- [64] S. Sinha und S. S. Chandel, "Review of software tools for hybrid renewable energy systems", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 32, S. 192–205, 2014.
- [65] P. M. Pardalos und M. G. C. Resende, *Handbook of applied optimization*. Oxford [u.a.]: Oxford Univ. Press, 2002, ISBN: 9780195125948.
- [66] R. Baños, F. Manzano-Agugliaro, F. G. Montoya, C. Gil, A. Alcayde und J. Gómez, "Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 15, Nr. 4, S. 1753–1766, 2011.
- [67] V. Machairas, A. Tsangrassoulis und K. Axarli, "Algorithms for optimization of building design: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 31, S. 101–112, 2014.
- [68] D. Schröder, *Intelligente Verfahren*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, ISBN: 978-3-642-11397-0.
- [69] W. Spendley, G. R. Hext und F. R. Himsworth, "Sequential Application of Simplex Designs in Optimisation and Evolutionary Operation", *Technometrics*, Jg. 4, Nr. 4, S. 441–461, 1962.
- [70] W. Domschke, A. Drexl, R. Klein und A. Scholl, *Einführung in Operations Research*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2015, ISBN: 978-3-662-48215-5.
- [71] J. A. Nelder und R. Mead, "A Simplex Method for Function Minimization", *The Computer Journal*, Jg. 7, Nr. 4, S. 308–313, 1965.
- [72] R. Hooke und T. A. Jeeves, "Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems", *Journal of the ACM*, Jg. 8, Nr. 2, S. 212–229, 1961.
- [73] O. Nelles, *Nonlinear System Identification*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001, ISBN: 978-3-642-08674-8.

Literatur

- [74] A.-T. Nguyen, S. Reiter und P. Rigo, "A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis", *Applied Energy*, Jg. 113, S. 1043–1058, 2014.
- [75] R. Battiti, M. Brunato und F. Mascia, *Reactive search and intelligent optimization*, 1., ed., softcover version of original hardcover ed. 2008, Ser. Operations research, computer science interfaces. New York, NY: Springer, 2010, Bd. 45, ISBN: 9781441934994.
- [76] J. Kennedy und R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization", *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks*, Nr. 4, S. 1942–1948, 1995.
- [77] S. Attia, E. Gratia, A. de Herde und J. L. Hensen, "Simulation-based decision support tool for early stages of zero-energy building design", *Energy and Buildings*, Jg. 49, S. 2–15, 2012.
- [78] J. A. Wright, "The optimised design of HVAC systems", Diss., Loughborough University, 1986.
- [79] Elsevier, *Scopus - Document search results: TITLE-ABS-KEY (optimization AND building AND science)*, Abrufbar unter <https://www.scopus.com>. (besucht am 01.03.2018).
- [80] J. A. Clarke, *Energy simulation in building design*, 2nd ed., first issued in hardback. London und New York: Routledge/Taylor & Francis Group, 2015, ISBN: 0750650826.
- [81] R. Garber, "Optimisation Stories: The Impact of Building Information Modelling on Contemporary Design Practice", *Architectural Design*, Jg. 79, Nr. 2, S. 6–13, 2009.
- [82] Michael Wetter und Jonathan Wright, "Comparison of a Generalized Pattern Search and a Genetic Algorithm Optimization Method", *Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands*, 2003. (besucht am 28.02.2018).
- [83] M. Iqbal, M. Azam, M. Naeem, A. S. Khwaja und A. Anpalagan, "Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 39, S. 640–654, 2014.
- [84] A. T. Nguyen und S. Reiter, "Passive designs and strategies for low-cost housing using simulation-based optimization and different thermal comfort criteria", *Journal of Building Performance Simulation*, Jg. 7, Nr. 1, S. 68–81, 2013.
- [85] M. Wetter und J. Wright, "A comparison of deterministic and probabilistic optimization algorithms for nonsmooth simulation-based optimization", *Building and Environment*, Jg. 39, Nr. 8, S. 989–999, 2004.
- [86] M. Wetter und E. Polak, "A convergent optimization method using pattern search algorithms with adaptive precision simulation", *Building Services Engineering Research and Technology*, Jg. 25, Nr. 4, S. 327–338, 2004.
- [87] K.-P. Lee und T.-A. Cheng, "A simulation–optimization approach for energy efficiency of chilled water system", *Energy and Buildings*, Jg. 54, S. 290–296, 2012.

- [88] A. Hasan, M. Vuolle und K. Sirén, “Minimisation of life cycle cost of a detached house using combined simulation and optimisation”, *Building and Environment*, Jg. 43, Nr. 12, S. 2022–2034, 2008.
- [89] N. Delgarm, B. Sajadi, F. Kowsary und S. Delgarm, “Multi-objective optimization of the building energy performance: A simulation-based approach by means of particle swarm optimization (PSO)”, *Applied Energy*, Jg. 170, S. 293–303, 2016.
- [90] F. Calise, “Thermoeconomic analysis and optimization of high efficiency solar heating and cooling systems for different Italian school buildings and climates”, *Energy and Buildings*, Jg. 42, Nr. 7, S. 992–1003, 2010.
- [91] E. Asadi, M. G. da Silva, C. H. Antunes und L. Dias, “A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB”, *Building and Environment*, Jg. 56, S. 370–378, 2012.
- [92] M. Wetter und E. Polak, “Building design optimization using a convergent pattern search algorithm with adaptive precision simulations”, *Energy and Buildings*, Jg. 37, Nr. 6, S. 603–612, 2005.
- [93] M. Ferrara, E. Fabrizio, J. Virgone und M. Filippi, “A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings”, *Energy and Buildings*, Jg. 84, S. 442–457, 2014.
- [94] M. Ferrara, J. Virgone, E. Fabrizio, F. Kuznik und M. Filippi, “Modelling Zero Energy Buildings: Parametric Study for the Technical Optimization”, *Energy Procedia*, Jg. 62, S. 200–209, 2014.
- [95] P. M. Congedo, C. Baglivo, D. D’Agostino und I. Zacà, “Cost-optimal design for nearly zero energy office buildings located in warm climates”, *Energy*, Jg. 91, S. 967–982, 2015.
- [96] M. Hamdy, A.-T. Nguyen und J. L. Hensen, “A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems”, *Energy and Buildings*, Jg. 121, S. 57–71, 2016.
- [97] R. Evins, “A review of computational optimisation methods applied to sustainable building design”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 22, S. 230–245, 2013.
- [98] W. Yu, B. Li, H. Jia, M. Zhang und Di Wang, “Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design”, *Energy and Buildings*, Jg. 88, S. 135–143, 2015.
- [99] F. Ascione, N. Bianco, C. d. Stasio, G. M. Mauro und G. P. Vanoli, “A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance”, *Energy and Buildings*, Jg. 88, S. 78–90, 2015.
- [100] F. Ascione, N. Bianco, C. de Stasio, G. M. Mauro und G. P. Vanoli, “Simulation-based model predictive control by the multi-objective optimization of building energy performance and thermal comfort”, *Energy and Buildings*, Jg. 111, S. 131–144, 2016.

Literatur

- [101] M. Hamdy, A. Hasan und K. Siren, "A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010", *Energy and Buildings*, Jg. 56, S. 189–203, 2013.
- [102] J. H. Kämpf, M. Wetter und D. Robinson, "A comparison of global optimization algorithms with standard benchmark functions and real-world applications using EnergyPlus", *Journal of Building Performance Simulation*, Jg. 3, Nr. 2, S. 103–120, 2010.
- [103] S. Carlucci und L. Pagliano, "An Optimization Procedure Based on Thermal Discomfort Minimization to Support the Design of Comfortable Net Zero Energy Buildings", in *Proceedings of BS2013, 13th Conference of International Building Performance Simulation Association, Chambéry, France, August 26-28, 2013*, S. 3690–3697.
- [104] Y. Lu, S. Wang, C. Yan und Z. Huang, "Robust optimal design of renewable energy system in nearly/net zero energy buildings under uncertainties", *Applied Energy*, Jg. 187, S. 62–71, 2017.
- [105] S. Attia, M. Hamdy, W. O'Brien und S. Carlucci, "Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design", *Energy and Buildings*, Jg. 60, S. 110–124, 2013.
- [106] M. Lindauer, "Dynamische Sensitivitätsanalysemethoden energetischer Wohngebäudequartierssimulationen", Diss., Technische Universität München, München, März 2017.
- [107] C. J. Hopfe, "Uncertainty and sensitivity analysis in building performance simulation for decision support and design optimization", Diss., Technische Universität Eindhoven, Eindhoven, Juni 2009, ISBN: 978-90-6814-617-2.
- [108] J. Maderspacher, "Robuste Optimierung in der Gebäudesimulation - Entwicklung einer Methode zur robusten Optimierung für die energetische Sanierung von Gebäuden unter unsicheren Randbedingungen", Diss., Technische Universität München, München, Juni 2017.
- [109] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, *Technische Regeln für Arbeitsstätten - Raumabmessungen und Bewegungsflächen*, Dortmund, 2013.
- [110] Deutsches Institut für Normung, *Heizungsanlagen in Gebäuden*, Berlin, 2003.
- [111] VDI - Verein Deutscher Ingenieure e.V. Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik, *Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation)*, Düsseldorf.
- [112] Deutsches Institut für Normung, *Raumflächenintegrierte Heiz- und Kühlsysteme mit Wasserdurchströmung*, Berlin, 2011.
- [113] H. Selg, *Einführung in die experimentelle Psychologie*, 4., überarb. Aufl., Ser. Urban-Taschenbücher. Stuttgart [u.a.]: Kohlhammer, 1975, Bd. 98, ISBN: 978-3172320312.
- [114] Deutsches Institut für Normung, *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*, Berlin, 2012.

- [115] K. Siebertz, D. van Bebbber und T. Hochkirchen, *Statistische Versuchsplanung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, ISBN: 978-3-642-05492-1.
- [116] A. Saltelli, *Sensitivity analysis*, Repr, Ser. Wiley series in probability and statistics. Chichester: Wiley, 2006, ISBN: 9780471998921.
- [117] G. Dellino und C. Meloni, Hrsg., *Uncertainty Management in Simulation-Optimization of Complex Systems: Algorithms and Applications*, Ser. Operations Research/Computer Science Interfaces Series. Boston, MA: Springer US, 2015, Bd. 59, ISBN: 978-1-4899-7546-1.
- [118] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo und M. Ratto, *Sensitivity Analysis in Practice*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2002, ISBN: 0470870931.
- [119] P. Heiselberg, H. Brohus, A. Hesselholt, H. Rasmussen, E. Seinre und S. Thomas, "Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings", *Renewable Energy*, Jg. 34, Nr. 9, S. 2030–2036, 2009.
- [120] C. Spitz, L. Mora, E. Wurtz und A. Jay, "Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house", *Energy and Buildings*, Jg. 55, S. 459–470, 2012.
- [121] I. Sobol, "Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates", *Mathematics and Computers in Simulation*, Jg. 55, Nr. 1-3, S. 271–280, 2001.
- [122] T. A. Mara und S. Tarantola, "Application of global sensitivity analysis of model output to building thermal simulations", *Building Simulation*, Jg. 1, Nr. 4, S. 290–302, 2008.
- [123] M. H. Kristensen und S. Petersen, "Choosing the appropriate sensitivity analysis method for building energy model-based investigations", *Energy and Buildings*, Jg. 130, S. 166–176, 2016.
- [124] D. Garcia Sanchez, B. Lacarrière, M. Musy und B. Bourges, "Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods", *Energy and Buildings*, Jg. 68, S. 741–750, 2014.
- [125] Y. Heo, R. Choudhary und G. A. Augenbroe, "Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty", *Energy and Buildings*, Jg. 47, S. 550–560, 2012.
- [126] S. de Wit und G. Augenbroe, "Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications", *Energy and Buildings*, Jg. 34, Nr. 9, S. 951–958, 2002.
- [127] H. J. Moon, "Uncertainty Analysis in Mould Spore Transportation and its Application in an Existing Building", *Indoor and Built Environment*, Jg. 19, Nr. 3, S. 355–365, 2010.
- [128] S. H. Hyun, C. S. Park und G. L. Augenbroe, "Analysis of uncertainty in natural ventilation predictions of high-rise apartment buildings", *Building Services Engineering Research and Technology*, Jg. 29, Nr. 4, S. 311–326, 2008.
- [129] V. Corrado und H. E. Mechri, "Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Energy Rating", *Journal of Building Physics*, Jg. 33, Nr. 2, S. 125–156, 2009.

Literatur

- [130] W. Tian, "A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 20, S. 411–419, 2013.
- [131] W. Burkhardt, R. Kraus und F. J. Ziegler, *Projektierung von Warmwasserheizungen: Mit CD-ROM: Verordnungstexte, Programme, Berechnungsbeispiele, Hinweise*, 7., überarb., erw. u. aktualisierte Aufl. München: Oldenbourg Industrieverl., 2006, ISBN: 978-3835630925.
- [132] M. Wetter, *GenOpt - Generic Optimization Program*, Abrufbar unter <https://simulationresearch.lbl.gov/GO/>, California, 2016. (besucht am 07.02.2018).

Abkürzungsverzeichnis

BAK	Baualtersklasse
CFO	Cost Function Optimization
COP	Coefficient of Performance
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EER	Energy Efficiency Ratio
EEWärmeG	Erneuerbare-Energien-Wärmegesetz
EnEV	Energieeinsparverordnung
FFO	Fitness Function Optimization
GenOpt	Generic Optimization Program
HJ	Hooke-Jeeves Algorithmus
OAT	one-step-at-a-time Methode
nZEB	Nearly Zero Energy Buildings
PHI	Passivhaus-Institut
PSO	Particle Swarm Optimization
SA	Sensitivitätsanalyse
SEER	Seasonal Energy Efficiency Ratio
TES	Thermischer Energiespeicher
TRNSYS	Transient Systems Simulations
UA	Unsicherheitsanalyse
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gegenüberstellung der Reallohnentwicklung und der Energiepreissteigerung 2000 - 2012	6
4.1	Prozentualer Anteil der primären und sekundären Heizenergieträger der genehmigten Nichtwohngebäude 2016	18
4.2	Beheizungsstruktur im Wohnungsneubau in Deutschland von 2000 bis 2016 .	19
4.3	Auftreffende Globalstrahlung auf einer horizontalen Fläche und 30° geneigter Fläche; Außentemperatur am Standort München-Riem	27
4.4	Jährlich neu installierte Kollektorfläche von Solarthermieanlagen in Deutschland	28
4.5	Endenergieverbrauch der privaten Haushalte für Wohnen in Deutschland 2016 nach Anwendungsbereich	29
4.6	Schematische Darstellung des Funktionsprinzips einer solarthermischen Anlage zum Betrieb einer Fußbodenheizung	31
4.7	Wirkungsgradvergleich solarthermischer Kollektoren	34
4.8	Kreislauf von thermisch-energetischen Simulationsprozessen	39
4.9	In- und Outputs von TRNSYS	40
4.10	Ablauf der Optimierung in TRNSYS und GenOpt	41
5.1	Darstellung des Optimums einer einfachen mathematischen Funktion	44
5.2	Darstellung der Optima (lokal und global) einer komplexen mathematischen Funktion	45
5.3	Funktionsprinzip der Simplex-Methode	47
5.4	Beispielhaftes Vorgehen der Simplex-Methode	47
5.5	Beispielhaftes Höhenbild des Hooke Jeeves-Tastverfahrens	49
5.6	Festgefahrener Optimierungsalgorithmus in einem lokalen Optimum	49
5.7	Beispielhaftes Höhenbild der Simulated Annealing Optimization	51
5.8	Beispielhaftes Höhenbild der Particle Swarm Optimization (PSO)	52

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

6.1	Veröffentlichungen zum Thema „Optimization in Building Science“ nach [79] in Anlehnung an [74]	55
6.2	Angrenzende Themenfelder von Optimierungsverfahren	56
6.3	Pareto-Front einer Optimierung mit 3 Zielfunktionen (jährlicher Heiz-, Kühl- und elektrischer Lichtenergiebedarf) nach [89]	61
7.1	Grundriss und Rendering der Untersuchungsgegenstands	67
7.2	Schematische Darstellung der Anlagentechnik und der gesetzten Parameter	68
7.3	Darstellung des Behaglichkeitsbands in Abhängigkeit der Außentemperatur nach [114]	72
7.4	Darstellung der Ausgangssituation nach Dimensionierung der Anlagentechnik nach anerkannten Regeln der Technik	76
7.5	Einfluss variierender Parameter auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes (1)	77
7.6	Einfluss variierender Parameter auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes (2)	78
7.7	Gegenüberstellung der Standardabweichungen der betrachteten Parameter	80
7.8	Screening der Ausgangssituation nach Morris	81
7.9	Flussdiagramm der Simulationsschritte	83
8.1	Trockentemperaturvergleich der Jahre 2018 und 2100	87
8.2	links: Gegenüberstellung der betrachteten Klimaszenarien sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (1)	89
8.3	links: Gegenüberstellung der betrachteten Klimaszenarien sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (2)	90
8.4	links: Gegenüberstellung der betrachteten Klimaszenarien sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (3)	92
8.5	links: Gegenüberstellung der betrachteten Klimaszenarien sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (4)	93
8.6	links: Gegenüberstellung der betrachteten, internen Lasten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (1)	95

8.7	links: Gegenüberstellung der betrachteten, internen Lasten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (2)	96
8.8	links: Gegenüberstellung der betrachteten, internen Lasten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (3)	97
8.9	links: Gegenüberstellung der betrachteten, internen Lasten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (4)	98
8.10	Links: Gegenüberstellung der betrachteten Luftwechselraten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (1)	100
8.11	Links: Gegenüberstellung der betrachteten Luftwechselraten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (2)	101
8.12	Links: Gegenüberstellung der betrachteten Luftwechselraten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (3)	102
8.13	Links: Gegenüberstellung der betrachteten Luftwechselraten sowie Einfluss von variierenden Parametern auf die Anzahl der Stunden innerhalb des Behaglichkeitsbandes, rechts: Analyse nach Morris (4)	103
8.14	Dreidimensionaler Ergebnisraum der Klimaszenarien 2018 (a) und 2100 (b)	105
8.15	Dreidimensionaler Ergebnisraum der Variation interner Lasten: 70 W (a) und 140 W (b)	106
8.16	Dreidimensionaler Ergebnisraum der raumluftechnischen Anlagen: Luftwechselrate $0,2\text{ h}^{-1}$ (a) und Luftwechselrate $1,0\text{ h}^{-1}$ (b)	107
8.17	Darstellung der operativen Raumtemperatur über der Außentemperatur für die Ausgangssituation	110
8.18	Darstellung der operativen Raumtemperatur über der Außentemperatur für die Optimierung aller Parameter	111
8.19	Darstellung der operativen Raumtemperatur über der Außentemperatur nach Optimierung aller Parameter und Erhöhung der Luftwechselrate auf $1,0\text{ h}^{-1}$	112
8.20	Darstellung der Optimierungsergebnisse	113
8.21	Darstellung der Optimierungsergebnisse	113

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

8.22 Darstellung der operativen Raumtemperatur über der Außentemperatur nach
Optimierung aller Parameter mit weiterem Intervall und einer Luftwechsel-
rate von $1,0\text{ h}^{-1}$ 114

Tabellenverzeichnis

4.1	Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der opaken Bauteile von Nichtwohngebäuden	12
4.2	Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der transparenten Bauteile von Nichtwohngebäuden	13
4.3	Angenommener Niedrigstenergiestandard 2021	13
4.4	Bauphysikalische Eigenschaften von ausgewählten Baustoffen nach [22] . . .	14
4.5	Unterteilung thermischer Energiespeicher	21
4.6	Thermische Kennwerte für Flächenheizungen/-kühlungen	24
5.1	Einteilung deterministischer Optimierungsverfahren	46
5.2	Einteilung stochastischer Optimierungsverfahren	51
7.1	Randbedingungen des Untersuchungsgegenstands	66
7.2	Randbedingungen der Gebäudenutzung	68
7.3	Intervallbereiche der Parameter	71
8.1	Resultate des Optimierungsverfahrens bei der Variation des Klimas	105
8.2	Resultate des Optimierungsverfahrens bei der Variation der internen Lasten .	107
8.3	Resultate des Optimierungsverfahrens bei der Variation der raumluftechnischen Anlagen	108
8.4	Gegenüberstellung der Ausgangssituation und der Ergebnisse der deterministischen Optimierung je Parameter	109
8.5	Gegenüberstellung der Ergebnisse der deterministischen und der stochastischen Optimierung je Parameter	110
8.6	Simulationsoutputs je Parameter nach abschließendem Optimierungsvorgang	114

